



**UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA DE CARTAGENA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LOS
ALIMENTOS Y DEL EQUIPAMIENTO AGRÍCOLA
ÁREA INGENIERÍA AGROFORESTAL**

**EFFECTOS DE LA APLICACIÓN DE
COBERTURAS DE SOMBREO SUSPENDIDAS
SOBRE BALSAS DE RIEGO**

José Francisco Maestre Valero

Cartagena, 2011



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LOS ALIMENTOS Y DEL
EQUIPAMIENTO AGRÍCOLA**

EFECTOS DE LA APLICACIÓN DE COBERTURAS DE SOMBREO SUSPENDIDAS SOBRE BALSAS DE RIEGO

EFFECTS OF SUSPENDED SHADE CLOTH COVERS ON AGRICULTURAL WATER RESERVOIRS

Memoria presentada por José Francisco Maestre Valero,
Ingeniero Agrónomo, para optar al grado de Doctor por la
Universidad Politécnica de Cartagena

Dirigida por los Drs. del Área de Ingeniería Agroforestal:

Victoriano Martínez Álvarez

Alain Baille

Cartagena, 2011

Esta memoria se presenta en la modalidad de compendio de publicaciones.

Los artículos que constituyen la tesis son los siguientes:

- **Publication 1: Maestre-Valero JF**, Martínez-Alvarez V, Gallego-Elvira B, Pittaway P. Effects of a suspended shade cloth cover on water quality of an agricultural reservoir for irrigation. 2011. *Agricultural Water Management*; 100, 70 – 75.
- **Publication 2: Maestre-Valero JF**, Martínez-Alvarez V. 2010. Effects of drip irrigation systems on the recovery of dissolved oxygen from hypoxic water. *Agricultural Water Management*; 97, 1806 – 1812.
- **Publication 3: Maestre-Valero JF**, Martínez-Alvarez V, Baille A, Martín-Górriz B, Gallego-Elvira B. 2011. Comparative analysis of two polyethylene foil materials for dew harvesting in a semi-arid climate. *Journal of Hydrology*; 210, 84 – 91.



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

AUTORIZACIÓN DE LA PRESENTACIÓN DE LA TESIS DOCTORAL
POR EL DIRECTOR

D. Victoriano Martínez Álvarez, Profesor Doctor del Área de Ingeniería Agroforestal en el Departamento de Ingeniería de Alimentos y del Equipamiento Agrícola

A U T O R I Z A:

La presentación de la Tesis Doctoral titulada “**Efectos de la aplicación de coberturas de sombreado suspendidas sobre balsas de riego**”, realizada por D. José Francisco Maestre Valero, en la modalidad de compendio de publicaciones, bajo mi dirección y supervisión, en el Departamento de Ingeniería de Alimentos y del Equipamiento Agrícola, y que presenta para la obtención del grado de Doctor por la Universidad Politécnica de Cartagena.

En Cartagena, a 6 de OCTUBRE de 2011

EL DIRECTOR DE TESIS

Fdo.: Victoriano Martínez Álvarez



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

AUTORIZACIÓN DE LA PRESENTACIÓN DE LA TESIS DOCTORAL
POR EL DIRECTOR

D. Alain Baille, Profesor Doctor del Área de Ingeniería Agroforestal en el Departamento de Ingeniería de Alimentos y del Equipamiento Agrícola

A U T O R I Z A:

La presentación de la Tesis Doctoral titulada **“Efectos de la aplicación de coberturas de sombreo suspendidas sobre balsas de riego”**, realizada por D. José Francisco Maestre Valero, en la modalidad de compendio de publicaciones, bajo mi dirección y supervisión, en el Departamento de Ingeniería de Alimentos y del Equipamiento Agrícola, y que presenta para la obtención del grado de Doctor por la Universidad Politécnica de Cartagena.

En Cartagena, a 7 de Octubre de 2011

EL DIRECTOR DE TESIS

Fdo.: Alain Baille



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA DE
CARTAGENA
COMISIÓN DE DOCTORADO



D. José Francisco Maestre Valero

Vistos los informes favorables de los Directores de Tesis y el VºBº de la Comisión Académica para la presentación de la Tesis Doctoral en la modalidad de “compendio de publicaciones” solicitada por D. José Francisco Maestre Valero, la Comisión de Doctorado de la Universidad Politécnica de Cartagena, en reunión celebrada el 14 de octubre de 2011, considerando lo dispuesto en el artículo 33 del Reglamento de Estudios Oficiales de Máster y Doctorado de la UPCT, aprobado en Consejo de Gobierno de 13 de abril de 2011,

ACUERDA

Autorizar la presentación de la Tesis Doctoral a D. José Francisco Maestre Valero en la modalidad de compendio de publicaciones.

Contra el presente acuerdo, que no agota la vía administrativa, podrá formular recurso de alzada ante el Sr. Rector-Magnífico de la Universidad Politécnica de Cartagena, en el plazo de un mes a partir de la notificación de la presente.

Cartagena, 17 de octubre de 2011

El Presidente de la Comisión de Doctorado



Pedro Sanchez Palma



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Comisión de Doctorado

**AUTORIZACIÓN DE LA PRESENTACIÓN DE LA TESIS DOCTORAL
POR LA COMISIÓN ACADÉMICA RESPONSABLE DEL PROGRAMA**

D. Francisco Artés Hernández, Coordinador de la Comisión Académica del Programa de Doctorado “Técnicas Avanzadas en Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario”

INFORMA:

Que la Tesis Doctoral titulada “**Efectos de la aplicación de coberturas de sombreo suspendidas sobre balsas de riego**”, ha sido realizada por D. José Francisco Maestre Valero, bajo la dirección y supervisión de D. Victoriano Martínez Álvarez y D. Alain Baille y que la Comisión Académica ha dado su conformidad para que sea presentada ante la Comisión de Doctorado.

La rama de conocimiento por la que esta tesis ha sido desarrollada es:

- ☐ Ciencias Básicas
- ☐ Ciencias Sociales y Jurídicas
- ☒ Ingeniería y Arquitectura

En Cartagena, a 4 de octubre de 2011

EL COORDINADOR DE LA COMISIÓN ACADÉMICA DEL PROGRAMA


Fdo.: Francisco Artés Hernández

Comisión de Doctorado

Agradecimientos

Personales

A mis directores de tesis los Drs. Victoriano Martínez Álvarez y Alain Baille por hacer posible el desarrollo de mi trabajo de investigación. Gracias por vuestro continuo apoyo e infinita paciencia y por transmitirme vuestros conocimientos.

Al Dr. Bernardo Martín, por su gran ayuda en los ensayos experimentales y por estar ahí siempre que le he necesitado.

A todos los miembros del Área Agroforestal, Dra. Mayla González-Real, Dra. María Dolores Gómez, Dr José Miguel Molina, Ana Fernández y en especial a mis compañeros de doctorado Belén, Maliko, Isa, Pedro, Gregorio y Eduardo por sus ánimos y compañerismo y a Joaquín por su ayuda y buen humor en todo momento.

A los Coordinadores del programa de doctorado Dr. Marcos Egea y Dr. Francisco Artés, por sus buenos consejos y apoyo.

A mis padres y toda mi familia por estar siempre a mi lado y darme fuerzas para seguir adelante.

A mis amigos y todos aquellos con los que he compartido buenos momentos durante estos estupendos años de realización de la tesis doctoral.

Finalmente a ti María José, que has vivido tan de cerca todo el proceso de realización de esta tesis doctoral, por tu apoyo incondicional, por tus sabios consejos, por tus valiosos comentarios sobre el desarrollo de esta memoria de tesis, por todo tu amor.

Institucionales

Al Ministerio de Ciencia e Innovación por la beca AP2007 – 03428 que me ha permitido realizar la tesis durante estos 4 años.

Al centro de investigación extranjero que han hecho posible la realización de mi estancia predoctoral:

- *Centre for Ecology and Hydrology (CEH)*, Oxfordshire, Reino Unido.

INDICE

1. Introducción.....	1
2. Resumen	5
3. Objetivos.....	19
4. Antecedentes y estado del arte.....	23
4.1. El agua en la Cuenca del Segura	23
4.1.1. Descripción general y climatología	23
4.1.2. Balance hídrico	25
4.2. Balsas de riego.....	34
4.2.1. Necesidad de las balsas de regulación de riego.....	34
4.2.2. Pérdidas de agua por evaporación	38
4.2.3. Prevención de la evaporación	40
4.2.4. Coberturas de sombreo suspendidas.....	41
4.2.5. Calidad del agua para riego y efectos de su almacenamiento	44
4.2.6. Técnicas para mejorar la calidad del agua en balsas	49
4.3. Condensación de rocío	51
4.3.1. El ciclo del agua	51
4.3.2. La formación de rocío.....	52
4.3.2.1. El enfriamiento radiativo	55
4.3.2.2. Condensación de vapor de agua sobre una superficie	59
4.3.3. Variables influyentes en la formación de rocío	60
4.3.3.1. Variables meteorológicas	62
4.3.3.2. Componentes de la radiación solar	65
4.3.4. Medición de la condensación de rocío	66
4.3.5. Métodos de estimación de la condensación de rocío.....	70
5. Publicaciones que constituyen la tesis.....	75
5.1. Publicación 1	75
5.1.1. Resumen de la publicación.....	75
5.1.2. Copia de la publicación	82
5.2. Publicación 2	89
5.2.1. Resumen de la publicación.....	89
5.2.2. Copia de la publicación	96
5.3. Publicación 3	103
5.3.1. Resumen de la publicación.....	103
5.3.2. Copia de la publicación	111
6. Conclusiones.....	119
7. Referencias	127
Apéndice I: Cartas de aceptación de las publicaciones	137
Publicación 1	137
Publicación 2	138
Publicación 3	139
Apéndice II: Índices de impacto de las publicaciones.....	141
Publicación 1	141
Publicación 2	141
Publicación 3	141

1. Introducción

En las regiones áridas y semiáridas, donde la escasez y la disponibilidad de agua varían estacionalmente, las balsas de riego son una instalación común para garantizar el suministro de agua a los cultivos. Para el caso particular de la Cuenca del Segura, región semiárida del sureste español que se caracteriza por la extraordinaria abundancia de balsas de riego, las mismas presentan dos problemas importantes que deben ser considerados; experimentan importantes pérdidas de agua por evaporación que afectan a la eficiencia de riego y, como consecuencia de la alta carga de nutrientes que poseen, favorecen la proliferación de microorganismos acuáticos (algas) que deterioran la calidad del agua y pueden comprometer el buen funcionamiento de las instalaciones de riego localizado características de esta región.

En este sentido, la aplicación de Coberturas de Sombreo Suspendidas (CSSs) sobre balsas de riego destaca entre las técnicas desarrolladas hasta la fecha para reducir las pérdidas de agua por evaporación. Recientemente, estudios realizados a pequeña escala han puesto de manifiesto que una parte importante de la reducción de la evaporación está relacionada con los procesos nocturnos de formación de condensación sobre la CSS. Como beneficio adicional, la instalación de CSSs sobre balsas de riego puede producir una mejora de la calidad del agua almacenada, aunque un posible efecto negativo es la reducción de la concentración de oxígeno disuelto en el agua que podría causar problemas agronómicos durante el riego. Estos tres aspectos, calidad del agua, recuperación de oxígeno disuelto en sistemas de riego localizado y formación de rocío sobre superficies pasivas son el objeto de esta tesis.

La tesis se presenta como un compendio de tres publicaciones de acuerdo al Reglamento de Estudios Oficiales de Máster y Doctorado aprobado en Consejo de Gobierno de 14 abril de 2011. Siguiendo las indicaciones de dicho Reglamento, la Memoria de la Tesis se estructura como se expone a continuación.

Inicialmente se expone un resumen general (epígrafe 2; también redactado en inglés) con el objetivo de exponer las distintas líneas de actuación de la tesis y los principales resultados obtenidos.

El epígrafe 3, también redactado en inglés, presenta los objetivos generales y específicos de la tesis. A continuación, en el epígrafe 4, se exponen los antecedentes y el estado del arte. Esta sección pretende presentar al lector información actualizada sobre aquellos temas de interés esencial para el adecuado seguimiento de la tesis, como son la

1. INTRODUCCIÓN

situación actual del agua en la Cuenca del Segura, los problemas asociados al almacenamiento de agua en balsas de riego y las técnicas disponibles para solventar esos problemas. Además permite profundizar en el conocimiento del fenómeno de formación de rocío sobre superficies como las CSSs o los Condensadores Radiativos Pasivos y analizar los factores físicos y ambientales que condicionan la formación natural de condensación.

El epígrafe 5 expone las diferentes publicaciones que componen la tesis y presenta, para cada publicación, un extenso resumen redactado en español. La primera de ellas (epígrafe 5.1) “*Effects of a Suspended Shade Cloth Cover on Water Quality on an Agricultural Reservoir for Irrigation*”, publicada en *Agricultural Water Management*, analiza el efecto de la instalación de una CSS sobre la calidad del agua de una balsa de riego sin regulación. La segunda publicación (epígrafe 5.2), “*Effects of Drip Irrigation Systems on the Recovery of Dissolved Oxygen from Hypoxic Water*”, también publicada en *Agricultural Water Management*, estudia el efecto de la instalación de un sistema experimental de riego localizado en la recuperación del oxígeno disuelto en el agua de riego. Finalmente, la tercera publicación (epígrafe 5.3), “*Comparative Analysis of Two Polyethylene Foil Materials for Dew Harvesting in a Semiarid Climate*”, publicada en *Journal of Hydrology*, permite profundizar en el conocimiento de los procesos de formación de condensación de agua sobre superficies.

El epígrafe 6, que también se redacta en inglés, recoge las principales conclusiones obtenidas en cada una de las líneas de actuación de la tesis. También se proponen futuras líneas de investigación que resultan de especial interés a la vista de los resultados y conclusiones obtenidos.

El documento finaliza con las referencias (epígrafe 7) y los apéndices I y II, donde se muestran las cartas de aceptación de las publicaciones y el índice de impacto de las revistas donde se publicaron.

1. Introduction

In arid and semi-arid regions, where water is scarce and its availability varies seasonally, agricultural water reservoirs for irrigation are commonly used to guarantee water supply throughout the whole irrigation season. In the semi-arid Segura River Basin (south-eastern Spain), those water reservoirs present two important drawbacks; they experiment substantially evaporation losses that affect the irrigation efficiency and favour the proliferation of aquatic microorganisms such as algae as a consequence of the high nutrient loading, that can damage the water quality and compromise the proper work of drip irrigation systems usually installed in that region.

In that sense, the installation of Suspended Shade Cloth Covers (SSCCs) on agricultural water reservoirs stand out among other techniques to reduce evaporation losses. Recent studies performed at small scale manifested that an important fraction of evaporation reduction is consequence of the nightly dew formation on the SSCC. Besides, the installation of SSCCs on water reservoirs improves water quality, although a negative effect of the SSCC installation on the water quality is the massive reduction of dissolved oxygen in the irrigation water that could cause agronomic problems to crops during the irrigation. Theses three aspects, water quality, dissolved oxygen recovery in drip irrigation systems and dew formation on surfaces are the object of the thesis.

This thesis is presented as a compendium of three publications according to the Reglamento de Estudios Oficiales de Máster y Doctorado approved in Consejo de Gobierno on April 14th 2011. According to those regulations, the thesis is structured as follows.

Firstly, a brief summary is exposed (epigraph 2, also written in English) aimed at commenting the different work lines of this thesis and the main results obtained from the research work.

Epigraph 3, also written in English, presents the general and specific objectives for each work line of the thesis. Then, epigraph 4 shows the state of the art. This section allows to bring up to date some information about the themes of substantial importance to the proper understanding of the thesis, such as the actual situation of the water in the Segura River Basin, the problems associated to the utilization of agricultural water reservoirs and the available techniques to solve the mentioned problems. Furthermore, it allows to deepen into the knowledge of the dew formation process on highly emissive

1. INTRODUCTION

surfaces such as SSCCs and radiative dew condensers and the physical factors driving the dew formation.

The three publications that compose this thesis are shown in epigraph 5. The first one (epigraph 5.1) “*Effects of a Suspended Shade Cloth Cover on Water Quality on an Agricultural Reservoir for Irrigation*”, published in *Agricultural Water Management*, analyzes the effect of the installation of a SSCC on water quality of an agricultural water reservoir. The second publication (epigraph 5.2) “*Effects of Drip Irrigation Systems on the Recovery of Dissolved Oxygen from Hypoxic Water*”, also published in *Agricultural Water Management*, analyzes the effect of an experimental drip irrigation system on the dissolved oxygen recovery from hypoxic water. Finally, publication 3 “*Comparative Analysis of Two Polyethylene Foil Materials for Dew Harvesting in a Semiarid Climate*”, published in *Journal of Hydrology*, allows to study the dew formation process on highly emissive surfaces.

Epigraph 6, also written in English, summarizes the main conclusions of the thesis for each work line. Besides, the future research lines that could be opened as a consequence of the ending of the studies presented in this thesis are proposed.

The document ends with the references (epigraph 7) and the appendixes I and II that show the publication acceptance letters and the respective journal impacts.

2. Resumen

En las últimas décadas la escasez de agua para riego ha aumentado en las regiones áridas y semiáridas. Así ocurre en la Cuenca del Segura (sureste de España), donde el incremento de la demanda agrícola ha ejercido una fuerte presión sobre los recursos hídricos, alcanzando un déficit estructural de 460 hm^3 que afecta a $2,7 \cdot 10^5$ ha de regadío (CHS, 2007). Con el objetivo de mejorar la eficiencia y la productividad del uso del agua en la agricultura de esta cuenca, los sistemas tradicionales de riego por gravedad se han transformado masivamente en sistemas de riego localizado. Actualmente, aproximadamente el 80% de la superficie regada en la cuenca (204.000 ha) se destina a riego localizado por goteo.

La distribución de las dotaciones de riego en la Cuenca del Segura se organiza generalmente mediante turnos, existiendo la problemática de ajustar el momento en que las reciben los regantes con la demanda de los cultivos. Por esta circunstancia muchos agricultores requieren la construcción de pequeñas balsas de riego con el fin de almacenar el agua y garantizar el suministro a los cultivos. Sin embargo, estos almacenamientos de agua presentan dos inconvenientes muy importantes que deben ser tenidos en cuenta:

- 1- Experimentan importantes pérdidas de agua por evaporación en climas áridos y semiáridos. En la Cuenca del Segura existen mas de 14.000 balsas de riego, que ocupan aproximadamente el 1,81% de la superficie regada y donde se producen unas pérdidas anuales por evaporación superiores a los 58 hm^3 , cifra que equivale al 8,3% del agua distribuida para riego (Martínez-Alvarez et al., 2008).
- 2- Presentan frecuentes crecimientos de algas como consecuencia de la elevada carga de nutrientes en el agua de riego, sobre todo si es de origen subterráneo, y de las favorables condiciones climáticas. El desarrollo de estas algas incrementa la concentración de sólidos en suspensión y produce importantes problemas en los sistemas de riego localizado, sobre todo por obturación en los emisores, repercutiendo en gran medida a la uniformidad de aplicación del agua (Bucks y Nakayama, 1991; Brainwood et al., 2004).

Actualmente existen nuevas tecnologías con elevado potencial para reducir la evaporación en balsas de riego (Craig et al., 2005). Resulta especialmente interesante la aplicación de Coberturas de Sombreo Suspendidas (CSSs). La aplicación de CSSs

2. RESUMEN

consiste en la instalación de una estructura reticular ligera sobre la balsa, fabricada mediante un doble entramado de cables de acero o plástico, los cuales se apoyan en el murete perimetral de la balsa o en postes de acero galvanizado anclados a zapatas o “muertos” de hormigón. Este doble entramado de cables sustenta una cobertura de polietileno y evita la succión del viento. La porosidad al aire y a la lluvia del material de cobertura es un requisito fundamental para evitar sobreesfuerzos estructurales.

Las CSSs permiten alcanzar factores anuales de reducción de la evaporación superiores al 80% y son, desde un punto de vista técnico, la opción más adecuada para reducir las pérdidas de agua por evaporación en balsas de riego de la Cuenca del Segura (Gallego-Elvira et al., 2010). Un posible beneficio adicional de estas coberturas (Finn y Barne, 2007) es la mejora de la calidad del agua al reducir: (i) el crecimiento normal de algas como consecuencia de la reducción de los niveles de radiación solar en la balsa, (ii) la entrada de suciedad y otras partículas arrastradas por el viento, y (iii) la salinidad del agua almacenada.

La primera línea de actuación de la tesis pretende evaluar el efecto de la instalación de las CSSs en la calidad del agua. Para ello se monitorizó una balsa de riego ubicada en la Estación Experimental de Investigación Agroalimentaria “*Tomás Ferro*” de la Universidad Politécnica de Cartagena (La Palma, Murcia). La balsa de riego, cuyas dimensiones son características de la zona de estudio, cuenta con una superficie de 2.400 m² y una profundidad de 5 m, resultando en una capacidad de almacenamiento en torno a 9.790 m³. La balsa está impermeabilizada mediante una geomembrana para prevenir las pérdidas de agua por infiltración.

El experimento se inició en abril de 2007 y se llevó a cabo durante dos años consecutivos, finalizando en abril de 2009. El primer año de experimentación la balsa permaneció descubierta, mientras que durante el segundo año se instaló una CSS de doble rafia de polietileno negro.

Al inicio del ensayo, la balsa se llenó con agua de distinta procedencia, que se mezcló para obtener una conductividad eléctrica de 2 mS cm⁻¹. Durante el periodo de experimentación la balsa no se usó para la regulación de riego, aunque se produjeron dos rellenos parciales. El primero, equivalente al 10,4% del volumen de almacenamiento de la balsa, se efectuó en septiembre de 2007 para compensar la evaporación estival. El segundo, equivalente al 3,8% de dicho volumen ocurrió en marzo de 2008, antes de la instalación de la CSS.

Para analizar la calidad del agua, se evaluaron los siguientes parámetros del perfil en profundidad de la balsa: temperatura del agua, conductividad eléctrica, concentración de clorofila, turbidez y Oxígeno Disuelto (OD). Además se monitorizaron la tasa de evaporación, la precipitación, la velocidad del viento y la radiación solar en la balsa descubierta. Durante el segundo año de experimentación también se añadieron sensores para determinar la radiación solar y la velocidad del viento bajo la cobertura.

Los principales resultados de este estudio indican que durante el primer año de experimentación la balsa se mantuvo en condiciones isotermas, apareciendo una fuerte estratificación térmica con la instalación de la CSS en marzo de 2008, que alcanzó un máximo de 12 °C en verano. El balance positivo entre lluvia y evaporación durante el segundo año de experimentación provocó una reducción de la conductividad eléctrica del agua (aproximadamente del 10%) que es beneficiosa desde el punto de vista agronómico, especialmente cuando se riega con aguas de baja calidad (Parry et al., 2005). La instalación de la CSS produjo una fuerte reducción de los niveles de radiación solar transmitida al agua (99%) y, por tanto, de la actividad fotosintética. Como ejemplo, la concentración de clorofila en el agua, indicador habitualmente empleado para evaluar la concentración de algas, se redujo significativamente tras la instalación de la cobertura, llegando a 0,70 $\mu\text{g L}^{-1}$ en el mes de julio. Además, la reducción de la velocidad del viento sobre la superficie del agua en la balsa (90%) limitó la difusión de oxígeno desde la atmósfera al agua (Gladyshev, 2002), circunstancia que, junto con la baja producción de oxígeno por la fotosíntesis y al consumo de oxígeno en la descomposición aerobia de la materia orgánica, redujo los niveles de OD hasta una situación de hipoxia (2 mg L^{-1}). Este resultado es acorde con el publicado por Bonachela et al. (2007), donde también detectaron una reducción de la concentración de OD en balsas cubiertas suministradas con aguas tratadas de depuradora. Sin embargo, estos autores no identificaron reducciones en balsas cubiertas suministradas con aguas limpias, probablemente debido a (i) la baja concentración de nutrientes y carga microbiana, (ii) el deterioro de la cobertura que permitió la transmisión de la radiación solar y (iii) la alta frecuencia de regulación para riego.

El OD es un parámetro de calidad del agua que puede llegar a representar un factor limitante en algunos sistemas de agricultura intensiva. Una baja concentración de OD en el agua de riego puede tener consecuencias críticas ya que su deficiencia en la raíz puede provocar reducciones de crecimiento, efectos negativos en el desarrollo e incremento de enfermedades (Bhattarai et al., 2005; Marfà et al., 2005). Morad (1995)

2. RESUMEN

estableció el umbral crítico de OD en el agua de riego en 3 mg L^{-1} , aunque otros investigadores (Armstrong y Drew, 2002) indicaron que el umbral de concentración de OD debe seleccionarse con precaución debido a la continua variación que el OD experimenta en el suelo.

Con el fin de evaluar la posible recuperación en la concentración de OD del agua almacenada en balsas cubiertas durante su tránsito por los sistemas de riego localizado, se realizó un estudio adicional sobre un sistema de riego localizado experimental. Este sistema estaba constituido por una bomba centrífuga que alimentaba cinco laterales de polietileno de 20 metros de longitud. Cuatro de ellos se destinaron a los tratamientos de baja concentración de OD mientras que el quinto fue el tratamiento control (agua saturada de OD). Dentro del grupo de los laterales destinados a agua con baja concentración de OD, tres de ellos se dotaron con emisores de riego localizado, mientras que el cuarto lateral se equipó con un inyector de aire tipo venturi. Se seleccionaron tres clases de emisores de riego localizado atendiendo a sus características hidráulicas y, por tanto, a la turbulencia de su flujo. De este modo, EM1 fue un emisor con laberinto insertado en la línea porta-goteros y caracterizado por su flujo turbulento, EM2 fue un emisor pinchado en la línea porta-goteros y caracterizado por un flujo turbulento intermedio y EM3 fue un microtubo caracterizado por su flujo cuasi-laminar. Después de pasar el agua a través de los emisores o del inyector de aire, ésta fluyó directamente al suelo.

La concentración de OD se determinó mediante un oxímetro portátil en diferentes puntos de muestreo: (i) en la balsa de riego, (ii) después de la bomba, (iii) después de los emisores, (iv) después del inyector de aire venturi, (v) en el suelo 24 horas después del riego y (vi) en agua para el tratamiento control. El OD en el suelo se registró con cuatro muestreadores de agua subterráneos que se instalaron con el fin de succionar el agua del suelo a la profundidad de 0,40 m.

Los resultados indican que el paso del agua por los emisores de riego y su posterior infiltración en el suelo fueron las etapas donde más oxigenación se produjo, siendo los emisores EM1 y EM2, caracterizados por su flujo más turbulento, los que mostraron mayores incrementos. Los niveles finales de OD en el suelo presentaron una correcta oxigenación del agua de riego, muy superior a los niveles críticos manifestados en la literatura (Marfà et al., 2005) y similares a los registrados en el tratamiento control. El aireador venturi aportó oxígeno al agua de riego, alcanzando concentraciones próximas a las del tratamiento control. La baja concentración de OD en el agua

almacenada no parece ser una limitación para la instalación de las coberturas ya que se recuperan los niveles normales de OD en el tránsito por los sistemas de riego localizado y el suelo. El diseño del sistema de riego puede influir en la recuperación de los niveles de OD, siendo la elección del emisor el factor más importante. Bajo las condiciones de un riego en cultivo hidropónico, carente de emisores de riego, no existe la posibilidad de oxigenar el agua de riego. Se requiere, por tanto, la instalación de inyectores de aire tipo venturi que incrementen la concentración de OD en la solución de riego cuando éste se realiza con agua de baja concentración de OD.

La segunda línea de actuación de la tesis es el estudio de los procesos de condensación sobre superficies. Los ensayos experimentales de distintos materiales de cobertura para balsas de riego, realizados a pequeña escala por Martínez-Alvarez et al. (2006), pusieron de manifiesto que una parte importante de la reducción de la evaporación estaba relacionada con los procesos nocturnos de condensación. Así, para el caso particular de la malla de doble rafia de polietileno negro, la condensación llegó a suponer el 20% de la reducción en la evaporación. Esta línea de actuación pretende analizar los factores físicos que condicionan la formación natural de la condensación de agua desde la atmósfera sobre superficies pasivas, como es el caso de las CSSs. Además, la recuperación de rocío en regiones áridas y semiáridas puede suponer una fuente alternativa de recursos hídricos no convencionales, por lo que el conocimiento de su potencial resulta de gran interés ya que podría ayudar a mitigar el impacto de eventos extremos como las sequías en estas regiones. Por tanto, el estudio que se recoge en esta tesis supone un punto de partida fundamental para la comprensión, análisis y futura modelización de los procesos de condensación de agua sobre CSSs.

Se han desarrollado distintos métodos y equipamiento para medir y cuantificar la producción de condensación, destacando el uso de Condensadores Radiativos Pasivos (CRPs) (Beysens et al., 2005a), como la opción más prometedora desde el punto de vista técnico y científico, ya que permite usar diferentes films y tipologías estructurales. Los CRPs estándares consisten en una estructura de 1 m² de superficie, inclinada 30° respecto al nivel del suelo, y revestidos con un film de un material altamente emisor (normalmente polietileno de baja densidad).

El estudio de la condensación se llevó a cabo mediante un diseño experimental consistente en dos CRPs, que se instalaron siguiendo las recomendaciones de la OPUR (International Organization for Dew Utilization) en la Estación Experimental de Investigación Agroalimentaria “Tomás Ferro”. El primero de ellos se cubrió con un

2. RESUMEN

film blanco de polietileno de baja densidad, especialmente diseñado por la OPUR para la producción de condensación, mientras que el segundo se cubrió con un film negro de polietileno de baja densidad, usado habitualmente en agricultura para acolchados. Se determinaron mediante espectroscopía las propiedades ópticas de ambos films en la región espectral del infrarrojo medio (2,5 – 25 μm) con el objetivo de determinar tanto su emisividad como la energía emitida, que son dos características fundamentales para el estudio de materiales utilizados en producción de agua de condensación.

La condensación producida en los CRPs durante el periodo de observación (de mayo de 2009 a mayo de 2010) se recogió por gravedad en una canaleta, que la condujo hasta un recipiente donde se pesó a escala diaria mediante una balanza de precisión. El diseño experimental se completó con el registro de las principales variables meteorológicas, la radiación de onda larga y la temperatura de ambos films.

La producción de condensación mostró una buena correlación con los valores nocturnos de humedad relativa, temperatura de rocío y radiación neta sobre los condensadores. Se desarrolló una relación empírica que explicó el 66% de la varianza total y que, por tanto, se considera adecuada para estimar la producción diaria de condensación. La producción de agua de los CRPs fue del orden de 20 mm anuales, cifra ligeramente superior a las producciones obtenidas en estudios previos en otras regiones mediterráneas (Muselli et al., 2002; Beysens et al., 2007; Muselli et al., 2009). Este resultado pone de manifiesto que los CRPs son una técnica adecuada para producir agua desde la atmósfera en regiones donde el acceso libre al agua y a la energía es extremadamente difícil y costoso.

Los resultados también indican que el film negro presenta ciertas ventajas sobre el film blanco, como la mayor emisividad y energía emitida en el rango más bajo del infrarrojo medio (2,5 a 7 μm), circunstancia que le permitió obtener una mejor producción de condensación. El film negro también tuvo una mayor vida útil y un menor coste que el film blanco, por lo que se considera que resulta más adecuado para su uso a gran escala.

Teniendo en cuenta que actualmente el umbral de precisión de los sensores de presión es aproximadamente $\pm 0,4$ mm de columna de agua, resulta prácticamente imposible cuantificar la condensación de rocío sobre superficies de agua tales como balsas y embalses. Por tanto, el desarrollo y validación experimental de modelos de condensación sobre superficies pasivas basados en la resolución del balance de energía

puede considerarse una futura línea de trabajo que permita estimar la condensación sobre CRPs, CSSs e incluso masas de agua.

Los resultados obtenidos en esta tesis, *“Efectos de la aplicación de coberturas de sombreo suspendidas sobre balsas de riego”* conjuntamente con los resultados obtenidos por la doctora Belén Gallego Elvira en su tesis presentada en 2010, *“Análisis de la evaporación en embalses de riego y de su reducción con coberturas de sombreo”*, ponen de manifiesto el notable interés del uso de CSSs sobre balsas de riego con el objetivo de reducir la evaporación y mejorar la calidad del agua en regiones áridas y semiáridas, donde la reducción en su disponibilidad, el deterioro de su calidad y su progresivo encarecimiento justifican su instalación.

2. Summary

Over the last decades, there have been significant water shortages especially in arid and semiarid regions. It happens in the Segura River Basin (south-eastern Spain) where an increasing demand of water has exerted heavy pressure on water resources, reaching a structural deficit of 460 hm^3 affecting to $2.7 \cdot 10^5 \text{ ha}$ of irrigation land (CHS, 2007). Traditional furrow irrigation has been almost entirely replaced by drip irrigation systems in an effort to improve both water use efficiency and productivity in agriculture. Currently, drip irrigation takes up 204.000 ha in the SRB, or approximately 80% of the irrigated land.

In this basin, the collective irrigation schemes, distribute water to farms generally by turns. There is an extended problem to fit the water supply and the crop water requirements. Accordingly, in order to deal with irregular water allotment and extended periods without water supply, many farms and collective irrigation schemes use Agricultural Water Reservoirs (AWRs). However, there are at least two drawbacks to the on-farm AWRs approach:

1- AWRs can experience significant evaporation losses in arid and semi-arid climates. There are more than 14,000 AWRs in the basin (1.81% of the irrigated land), with annual evaporative loss estimates of 58.5 hm^3 , equivalent to 8.3% of the water consumed by agriculture (Martínez-Alvarez et al., 2008).

2- The high nutrient loading in AWRs induce frequent algal blooms, especially if the water comes from a subsurface origin and there are favourable climatic conditions. Those algae increase the concentration of suspended particulate matter in the water and can cause serious problems in drip irrigation systems, like clogging emitters and affecting the uniformity of water application (Bucks and Nakayama, 1991; Brainwood et al., 2004).

Nowadays, new technologies have been developed to reduce evaporative loss from AWRs (Craig et al., 2005). It is especially interesting the installation of Suspended Shade Cloth Covers (SSCCs). SSCCs installation consists of covering the AWR surface with a shade cover that is supported by a double reticulated frame structure made of steel or polyamide cables. The cables are anchored either into the storage wall or to galvanised steel posts bolted to concrete footings. A black double polyethylene fabric is then attached between the frames and suspended over the AWR. The fabric is porous to water and air to avoid an excessive structural effort.

2. SUMMARY

SSCCs allow to reach annual evaporation reduction factors higher than 80% and they are from a technical point of view, a suitable option to reduce evaporation from AWRs in the Segura River Basin (Gallego-Elvira et al., 2010). An additional benefit of covering AWRs with SSCCs is to improve water quality by (1) reducing algal photosynthesis and primary production by reducing incident solar radiation, (2) excluding wind-borne dust and debris and (3) reducing the salinity of the stored water.

The first part of the thesis aims at assessing the effect of the installation of a SSCC in the stored water quality. To carry out with this objective, an experimental AWR located at the Agricultural Experimental Station “*Tomás Ferro*” of the Technical University of Cartagena (La Palma, Murcia) was monitored. The experimental AWR is a typical on-farm, medium-term storage in the site of study. It has a surface area of 2,400 m², a depth of 5 m, with a storage capacity of 9,790 m³. Seepage through its walls and bottom is prevented by means of a waterproof liner.

The experiment started in April 2007 and was performed for two consecutive years, concluding in April 2009. In the first year, the AWR remained uncovered, whereas in the second year, the SSCC was installed.

At the start of the trial, the AWR was filled with water piped from diverse sources to get the electrical conductivity to 2 mS cm⁻¹. During the two-year experimental period, the AWR was not used for irrigation purposes, and there were just two partial refills. The first one (10.4% of the maximum stored volume) occurred in September 2007 in order to compensate for summer evaporation. The second refill (3.8% of the maximum stored volume) was performed prior to the installation of the SSCC in March 2008.

To evaluate water quality, the following parameters were measured in the water profile: water temperature, electrical conductivity, chlorophyll – a, turbidity and Dissolved Oxygen (DO). Besides, the evaporation rate, rainfall, wind speed and solar radiation were continuously monitored above the water in the uncovered AWR. During the second year of experimentation, additional sensors were installed to measure wind speed and transmitted solar radiation under the cover.

The main results of this study manifest that in the first year, the AWR behaviour was quasi-isothermal whereas in the second year, installing a SSCC in March 2008 induced a thermal gradient in the water that reached a maximum temperature difference of 12 °C during summer. The positive balance between rainfall and evaporation during the second year reduced the *EC* (approximately 10%) which can produce agronomic

benefits when low quality water is stored for irrigation (Parry et al., 2005). The installation of the SSCC reduced the transmitted solar radiation by 99%, hence the photosynthetic activity. As an example, the chlorophyll – a, indicator usually used to determine algae concentration, was strongly reduced after the SSCC installation reaching a minimum value of $0.70 \mu\text{g L}^{-1}$. Besides, the wind effect reduction on the water surface (90%) avoided the formation of waves, limiting the rate of molecular diffusion of oxygen (Gladyshev, 2002). That, joined to the reduced photosynthetic activity that produced low oxygen and the use the oxygen by bacteria in the decomposition of the organic matter, lead to very low DO levels (2 mg L^{-1}). This result is in concordance with that published by Bonachela et al. (2007) who reported a DO reduction in covered on-farm AWRs fed with treated wastewater located in a nearby area. However, these authors did not record low DO values in covered on-farm AWRs fed with fresh water, probably due to (1) low nutrient and microorganism load in the AWRs fed with fresh water, (2) shade-cover deterioration that allows a higher percentage of solar radiation transmission and (3) high irrigation regulation frequency.

DO is an important irrigation water quality parameter that can be a limiting factor in some intensive agriculture systems. A low DO in the irrigation water may have critical consequences, as it causes root oxygen deficiency which in turn can lead to agronomic problems such as crop stress, slow plant growth, or low yields or increases in disease (Bhattarai et al., 2005; Marfa et al., 2005). Morard (1995) set the critical DO of the irrigation water in 3 mg L^{-1} . However, Armstrong and Drew (2002) indicated that this DO threshold must be assumed with caution, since oxygen content in the root media is continuously varying in field conditions.

With the purpose of assessing the DO recovery in stored water in covered AWRs in its passage through the drip irrigation systems, an additional studio was carried out on an experimental drip irrigation system. This experimental design consisted of a drip irrigation hydraulic system composed of a centrifugal water pump and five laterals, which were made using 20-meter-long polyethylene drip irrigation pipes. Four of them were devoted to the low DO treatments, whereas the fifth was the control treatment lateral, (DO at saturation). The first three low DO treatment laterals were fitted with surface drip irrigation emitters while the fourth, lacking emitters, was equipped with a venturi air injector. Three different types of commercial drip emitters were selected according to flow regime criteria (turbulent to laminar). EM1 was an inserted in-line labyrinth emitter classified as a turbulent flow emitter. EM2 was a punched on-line

2. SUMMARY

emitter classified as an intermediate turbulent flow emitter. EM3 was an on-line micropipe typically used in pots and greenhouses classified as a quasi-laminar flow emitter. Water, after passing through the emitters and the venturi air injector, flowed directly on the ground.

The DO was measured by means of a handheld dissolved oxygen meter at different sampling points: (i) in the AWR, (ii) after the centrifugal pumping, (iii) after passage through the emitters, (iv) after the venturi air injector, (v) in the soil 24 hours after the irrigation and (vi) in water of the control treatment. DO in the soil was measured using four subsurface water samplers installed at a depth of 0.4 m to suck the water up.

Results show that the passage by the emitters and the subsequent infiltration in the soil were the stages where more oxygenation was detected. Emitters EM1 and EM2, characterised by their turbulent flow, showed the highest increases. Final DO levels in the soil showed a correct oxygation rather higher than the threshold levels manifested in literature (Marfà et al., 2005) and similar to the levels found in the control treatment. The venturi air injector supplied oxygen to the water reaching similar levels to the control treatment.

Low DO in the stored water apparently is not a limitation to the installation of SSCCs, since the drip irrigation system and after the passage through the soil increase DO in irrigation water up to normal levels. The irrigation system design can have influence on the DO recovery, being the election of the emitters the most important factor. Under conditions of hydroponic irrigation systems, lacking drip emitters, there is no chance for water oxygation and the use of venturi air injectors is highly recommended to increase the DO in the irrigation nutritious solution when water supply comes from a source with low DO.

The second part of the thesis aims at studying the dew formation process on surfaces. Experimental trials with different materials to cover AWRs performed at small scale by Martínez-Alvarez et al. (2006) showed that an important fraction of the evaporation reduction was a consequence of the nightly dew formation processes. For a double black polyethylene shade cover, condensation of water was about 20% of the evaporation reduction. This objective expects to analyse the physical factors driving passive dew formation from atmosphere on surfaces, as SSCCs. Besides, dew recovery in arid and semiarid regions may be a good alternative to other non conventional water resources and a better knowledge of its potential is of great interest given that it could

help in mitigating the impact of extreme drought events. Hence, this thesis is the starting point to contribute to a better knowledge, analysis and future modelation of the dew formation process on SSCCs.

There are several methods aimed at measuring and producing water from dew, stressing the passive Radiative Dew Condensers (RDCs) (Beysens et al., 2005a) that from a scientist and technical point of view are the most promising option as they allow to assess the performance of different types of foils and supporting structures. Standard RDCs consist of 1 m² insulated flat pans tilted 30° to horizontal and dressed with a high emissive film (usually low density polyethylene).

In this study, the analysis of the dew formation was performed by means of two RDCs that were installed at the Agricultural Experimental Station “*Tomás Ferro*” following the OPUR (International Organization for Dew Utilization) instructions. One of the RDC was fitted with a low density white hydrophilic foil recommended as standard for dew recovery by OPUR, and the other with a low density black polyethylene foil widely used for mulching in horticulture. Optical properties (emissivity and emitted radiance) of both foils were analysed by spectroscopy in the range of the mid infrared spectrum (2.5 – 25 µm). Both characteristics are fundamental for materials used to produce water from atmosphere.

Dew was collected during the experimentation process (from May 2009 to May 2010) by gravity by a gutter and passed through a plastic pipe into the container where it was weighed at daily scale by means of a high precision balance. The experimental design was completed by registering the main meteorological variables, the atmospheric radiation and the surface temperature of both foils.

Dew showed a good relation with the nightly values of relative humidity, dew point temperature and net radiation on the RDCs. An empirical relationship was proposed and explained about two-thirds of the total variance (66%) and hence, it could be used to estimate daily dew yield with reasonable accuracy. Dew yield was in the order of 20 mm for both foils. This value was somewhat higher than those observed in previous studies in other Mediterranean regions (Muselli et al., 2002; Beysens et al., 2007; Muselli et al., 2009). This result highlight that RDCs are a suitable option to recovery water from atmosphere in regions where the free access to water and energy is difficult and costly.

Results also stress that the black foil presents several advantages over the white foil such as higher emissivity and emitted radiance in the low range of the mid infrared

2. SUMMARY

spectrum (2.5 – 7 μm) that allow to get a higher dew yield. Besides, the black foil had longer lifespan, and lower cost than the white foil, thus it is considered more suitable to be used at a bigger scale.

Considering that nowadays sensors accuracy to measure variations in the water column is about ± 0.4 mm, it is practically impossible to quantify the dew yield on water surfaces such as AWRs or great dams. Therefore, the development and experimental validation of dew formation models on passive surfaces based on the energy balance may be a future work line to estimate dew formation on RDCs, SSCC or even water bodies.

Results obtained in this thesis, “*Effects of suspended shade cloth covers on agricultural water reservoirs*” and in the thesis presented by Belén Gallego Elvira in 2010, “*Study of evaporation from irrigation reservoirs and its mitigation by means of shade covers*” manifest the notable interest of the application of SSCCs on agricultural reservoirs aimed at reducing evaporation losses and improving water quality in arid and semiarid regions where the reduction in water availability, deterioration of water quality and its progressive cost increase justify their installation.

3. Objetivos

Los **objetivos generales y específicos** de la tesis son los siguientes:

1. Analizar el efecto de la instalación de una cobertura de sombreado suspendida sobre la calidad del agua almacenada en balsas de riego. Este objetivo incluye.
 - 1.1. Identificar los principales parámetros relativos a la calidad del agua en balsas de riego.
 - 1.2. Evaluar el efecto de la instalación de una cobertura de sombreado sobre cada uno de los parámetros de calidad del agua.
 - 1.3. Estudiar las relaciones existentes entre los diferentes parámetros de calidad del agua.
 - 1.4. Valorar las posibles ventajas agronómicas resultantes de la instalación de una cobertura de sombreado suspendida.
2. Analizar y valorar los efectos de un sistema de riego localizado en la recuperación de la concentración de oxígeno disuelto en aguas con niveles de hipoxia.
 - 2.1. Valorar los posibles problemas asociados al riego que se pueden derivar de la baja concentración de oxígeno disuelto que presentan las aguas almacenadas en balsas con coberturas de sombreado.
 - 2.2. Caracterizar y analizar el incremento en la concentración de oxígeno disuelto que se produce en agua hipóxica cuando transita por cada una de las diferentes etapas de los sistema de riego localizado y en el suelo.
 - 2.3. Evaluar el potencial en la recuperación de oxígeno disuelto de diferentes tipos de emisores de riego, teniendo en cuenta sus características hidráulicas.
 - 2.4. Evaluar los efectos sobre la recuperación del oxígeno disuelto en el agua de la instalación de aireadores tipo venturi en sistemas de riego localizado.
3. Analizar y comparar experimentalmente la producción de condensación de dos films de polietileno en un clima semiárido.
 - 3.1. Identificar los diferentes métodos y tipologías de estructuras para la producción de condensación y seleccionar el más apropiado en función de los objetivos del estudio.
 - 3.2. Comparar las propiedades y analizar el rendimiento de un film de polietileno negro de baja densidad (de material similar al de una cobertura de sombreado) con respecto al film estándar de polietileno blanco.

3. OBJETIVOS

- 3.3. Analizar los factores físicos que controlan la formación de rocío para entender el proceso de formación de condensación sobre superficies pasivas en un clima semiárido.
- 3.4. Valorar el potencial de producción de condensación bajo condiciones climáticas características del sureste español.

3. Objectives

The **general and specific objectives** of this research work are the following:

1. To analyse the effect of the installation of a suspended shade cloth cover on water quality of agricultural reservoirs for irrigation, including:
 - 1.1. To identify the main water quality parameters for agricultural reservoirs for irrigation.
 - 1.2. To evaluate the effect of the installation of a suspended shade cloth cover on water quality parameters.
 - 1.3. To study the existent relationships between the different water quality parameters.
 - 1.4. To assess the possible agronomic benefits of the installation of a suspended shade cloth cover.
2. To analyse and assess the effect of a drip irrigation system on the recovery of dissolved oxygen from water with hypoxic levels.
 - 2.1. To assess the problems associate to irrigation derived from the low dissolved oxygen concentration in stored water in covered agricultural reservoirs.
 - 2.2. To characterize and analyse the dissolved oxygen concentration increase in hypoxic water throughout the different stages of drip irrigation systems and in the soil.
 - 2.3. To evaluate the potential in the dissolved oxygen recovery of different drip irrigation emitters classified according to their hydraulic characteristics.
 - 2.4. To evaluate the effects on the dissolved oxygen recovery of the installation of a venturi air injector in drip irrigation systems.
3. To analyse and compare two films made of low density polyethylene aimed at producing dew in a semiarid climate.
 - 3.1. To identify different methods and typologies of structures for dew formation and collection and to select the most appropriated for the study.
 - 3.2. To compare the properties and analyse the performance of a black polyethylene film with similar characteristics to a SSCC with respect to the standard white polyethylene foil.
 - 3.3. To analyse the physical factors that control the dew formation to understand its process in a semiarid climate.

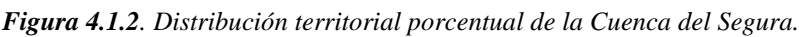
3. OBJECTIVES

3.4. To assess the potential for dew collection under climatic conditions characteristics in the southern Spain.

4.1. El agua en la Cuenca del Segura

4.1.1. Descripción general y climatología

Fuente: Confederación hidrográfica del Segura, CHS, www.chsegura.es



23

4. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

Más del 50% del terreno de la cuenca corresponde a uso agrícola. La población es de aproximadamente 2 millones de habitantes (>4% de la población nacional), incrementándose en medio millón en la época estival debido a la afluencia turística (Instituto Nacional de Estadística, INE, 2006).

La cuenca posee un territorio de gran variedad orográfica alternando montañas con valles, depresiones y llanuras, con cotas máximas superiores a los 2.000 m de altitud en zonas de cabecera. El 81% de su extensión se sitúa por debajo de los 1.000 m, y el 18% de su territorio no sobrepasa los 200 m sobre el nivel del mar.

El clima de la CS está en general caracterizado por la escasez de precipitaciones y temperaturas que dan lugar a inviernos suaves y veranos cálidos. Debido a la gran variabilidad de los factores que condicionan el clima de la cuenca (latitud, componentes atmosféricos y climáticos, topografía, orientación y exposición, y distancia al mar), se observan importantes diferencias climáticas entre zonas geográficas. De los grupos climáticos establecidos por Papadakis, la CS se identifica con el denominado clima Mediterráneo, y los subtipos Mediterráneo templado, Mediterráneo continental, Mediterráneo subtropical, y Mediterráneo semiárido subtropical.

La distribución espacial de las precipitaciones medias anuales muestra una estrecha relación entre su orografía y el volumen de precipitación (Fig. 4.1.3.a). En general la precipitación anual en la mayor parte de la cuenca es baja, aproximadamente 300 – 400 mm año⁻¹, aunque en las zonas de montaña situadas en el noroeste de la cuenca los registros pluviométricos anuales llegan a superar los 1.000 mm año⁻¹. Además cabe señalar que a diferencia de las lluvias medias anuales, las máximas diarias se dan en las zonas medias y bajas, más próximas al mar, debido a fenómenos convectivos que producen los aguaceros más intensos, provocando inundaciones que tienen lugar habitualmente al finalizar el periodo estival.

Las temperaturas también están estrechamente relacionadas con los factores que se citaron anteriormente como la latitud, la altitud y la orientación, los cuales originan la diversidad termométrica que existe en CS (Fig. 4.1.3.b). En la mayor parte de la cuenca los valores de temperatura media anual se encuentran entre los 16 y los 18 °C. En las sierras del noroeste se observan las temperaturas medias más bajas anuales (10 °C). Desde estas sierras, y descendiendo hacia el litoral, la temperatura media anual aumenta, alcanzando los 18 °C. El régimen anual de temperaturas, presenta un mínimo invernal en los meses de diciembre y enero y los máximos anuales corresponden a los meses de julio y agosto.

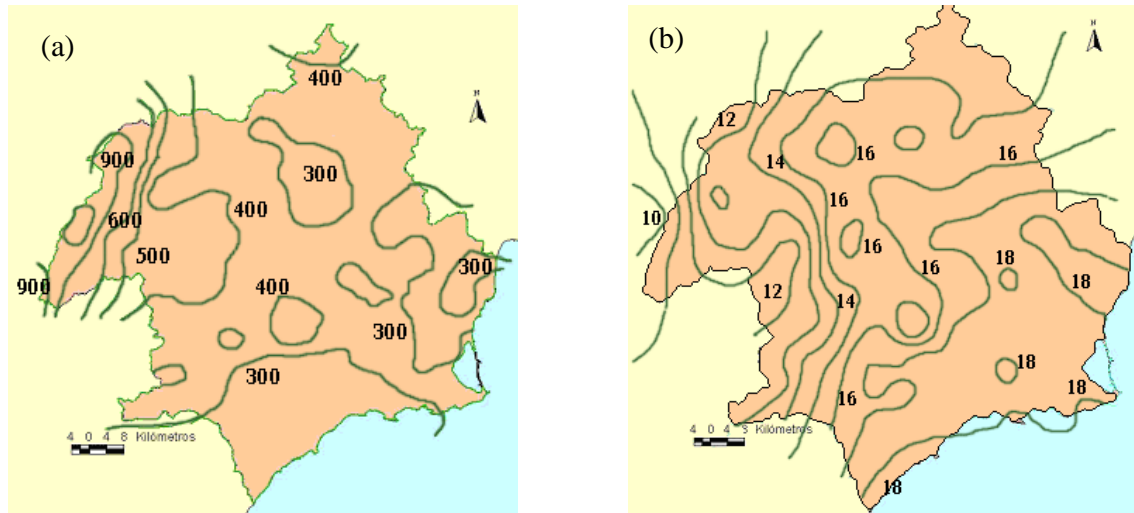


Figura 4.1.3. (a) Precipitación media anual (mm año^{-1}); (b) Temperatura media anual ($^{\circ}\text{C}$).

Fuente: Plan hidrológico de Cuenca del Segura (PHCS) (CHS, 1998).

4.1.2. Balance hídrico

La acusada escasez de recursos disponibles de la CS hace que su balance hídrico sea muy singular, recibiendo agua de cinco fuentes diferentes. Además de los recursos ordinarios superficiales y subterráneos, se obtienen y aprovechan otras fuentes de agua como las aportaciones recibidas desde el río Tajo a través del acueducto Tajo-Segura y los denominados recursos no convencionales (reutilización de las aguas residuales depuradas y desalinización).

En las siguientes líneas se resume el balance hídrico de la cuenca. Se presentan los recursos y demandas contemplados en el Plan Hidrológico de Cuenca PHCS (CHS, 1998), y además, se incluyen datos adicionales más actuales, con el objetivo de mostrar la variación que en los últimos años han sufrido las cifras ya obsoletas del PHCS. Finalmente se presenta una figura-resumen del balance hídrico del PHCS (Fig. 4.1.6) y se identifican las modificaciones contempladas en planes y estudios posteriores (Tabla 4.1.2).

Recursos

Superficiales

Los recursos superficiales contemplados en el PHCS son 640 hm^3 anuales. Posteriormente, el “Plan de Actuación en Situaciones de Alerta y Eventual Sequía en la Cuenca del Segura” (PASAESCS, 2006) actualizó estos datos. Este plan que considera la media de los últimos 25 años hidrológicos hasta 2005, indica que los recursos

4. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

superficiales ascienden a 664 hm³ anuales. Además previó que en la actualidad esa cifra podría considerarse en ese orden de magnitud, alrededor de los 650 – 700 hm³ anuales.

Agua trasvasa por el Acueducto Tajo-Segura

El Acueducto Tajo-Segura (ATS), el cual transfiere recursos entre la cuenca del Tajo y las cuencas receptoras del Segura, Júcar y Mediterránea Andaluza, inició sus primeros trasvases de agua en el año 1979. Los volúmenes a trasvasar inicialmente asignados fueron de 600 hm³ anuales, aunque en el ámbito de la planificación se considera un 10% de pérdidas en el transporte, de manera que la asignación real de recursos del ATS fue de 540 hm³ anuales. Del total, un 26% (140 hm³) de los recursos anuales se destinaron a abastecimiento urbano (Mancomunidad de los Canales del Taibilla) y el resto (400 hm³) anuales se destinaron a riegos. El Sindicato Central de Regantes del Acueducto Tajo-Segura (SCRATS), facilita los volúmenes totales de agua trasvasada por año hidrológico desde 1979 hasta la actualidad (Fig. 4.1.4). La media de agua trasvasada entre 1979 y 2010 es de 330 hm³ (± 147 hm³), de los cuales 202 hm³ (± 128 hm³) fueron destinados a regadío. En la Fig. 4.1.4 se observa la gran variabilidad interanual de los volúmenes de agua trasvasada. En ciclos húmedos, se observan mayores volúmenes trasvasados, mientras que en ciclos de sequía estas cantidades disminuyen drásticamente. Por ejemplo, en el periodo 1996-2005, correspondiente con un ciclo húmedo, el volumen medio anual trasvasado ascendió a 476 hm³ (326 hm³ para regadío), mientras que en los últimos cuatro años (ciclo seco) la cifra desciende a 261 hm³, llegando tan sólo 130 hm³ para regadío.

Aunque el diseño del Plan de Cuenca contó con volúmenes de agua trasvasada teórica de 540 hm³, la práctica ha puesto de manifiesto que la media es considerablemente inferior (210 hm³ inferior a lo esperado), y que en años de poca disponibilidad de recursos en el Tajo (2006 - 2010), la cifra real trasvasada es tan sólo el 48% de la teórica.

Agua subterránea

Tanto el PHCS (CHS, 1998) como su actualización (2001), y más recientemente el “Informe de los Artículos 5 y 6 de la Directiva Marco de las Aguas” (DMA, 2005), incluyen balances hidrometeorológicos efectuados en las unidades hidrogeológicas de la CS que estiman los recursos subterráneos de la cuenca.

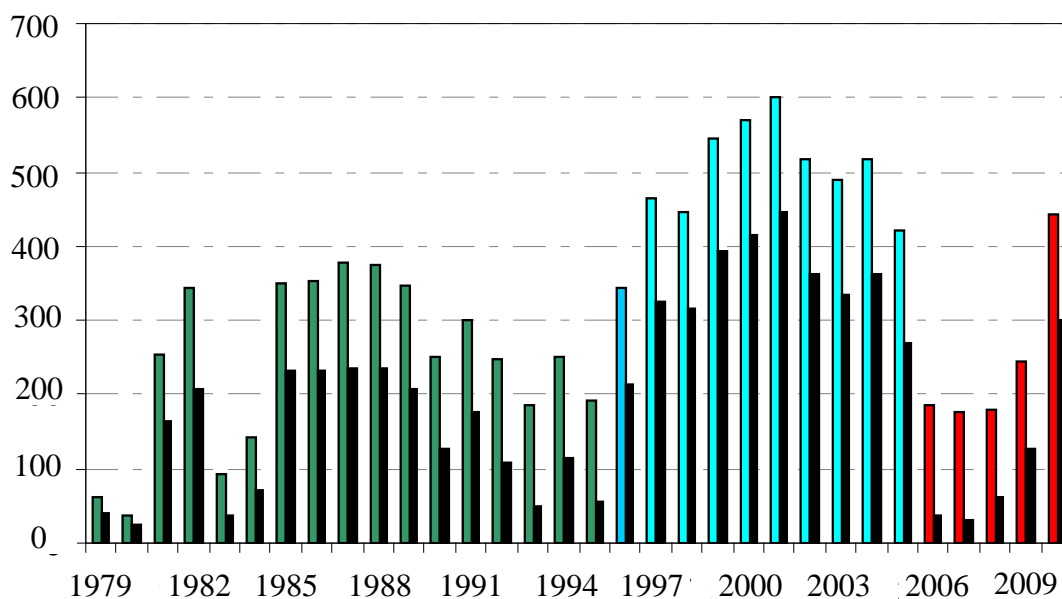


Figura 4.1.4. Volúmenes de agua anuales totales trasvasados por el Acueducto Tajo-Segura. Las barras en color negro presentan el total anual de agua trasvasa para riego. Los grupos de barras de colores señalan periodos con diferente disponibilidad de agua trasvasada.

El PHCS cuantifica en 220 hm³ el volumen de recursos renovables extraíbles mediante bombeo. Según el informe de la DMA el recurso disponible es de 635 hm³ año⁻¹, pudiendo explotar el mismo de forma superficial (embalses) o de forma subterránea mediante bombeos renovables. Hay que señalar que en la cifra de recurso disponible, una parte importante aflora al exterior a través de los manantiales y las aportaciones distribuidas por el subálveo, conformando el caudal base de los ríos, por lo que existe una parte importante de estos recursos que ya están contabilizados como aguas superficiales, no siendo por tanto esta cifra directamente comparable a la contemplada en el PHCS. Para que estas cifras sean comparables, el PASAESCS contempla los recursos explotables correspondientes, siendo para el informe de la DMA, 121,5 hm³ el volumen de agua subterránea disponible.

Es interesante señalar también que en el informe de PASAESCS, así como trabajos realizados para la elaboración del “Libro Blanco de las Aguas Subterráneas”, se hace especial hincapié sobre los problemas de sobreexplotación y salinización de acuíferos de la cuenca del Segura.

Agua residual reutilizada

Actualmente, prácticamente todos los caudales que se vierten en la propia cuenca son reutilizados de forma directa o indirecta. El número de EDARs (Estación de Depuración

de Aguas Residuales) se ha incrementado considerablemente en los últimos años, y la Confederación está gestionando las concesiones de estos caudales para su uso directo para riego. En el ámbito de la Confederación Hidrográfica del Segura existen un total de 122 depuradoras, con una capacidad anual de 209 hm^3 al año. En el año 2004 se trataron aproximadamente 140 hm^3 (PASAESCS, 2006). La asignación anual para riego (cultivos y algún campo de golf) de aguas reutilizables es de $61 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$. El resto de aguas residuales se vierten directamente a los cauces, siendo reutilizadas indirectamente para regadío, salvo en el caso de las depuradoras costeras que vierten directamente al mar. Estas depuradoras costeras suponen un recurso adicional de aproximadamente $15,2 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$, que con los adecuados tratamientos podría llegar a utilizarse.

El PHCS (CHS, 1998) contemplaba en el balance hídrico unos recursos de agua reutilizada $100 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$, que esperaba aumentar a $118 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$ para un horizonte de 20 años. En el Programa AGUA (2004-2008) (Fig. 4.1.5) se propuso ampliar la capacidad de reutilización directa mediante las EDAR del Mar Menor Sur, del Mar Menor Norte y la ampliación de Murcia, en una cantidad adicional de 35 hm^3 anuales (Tabla 4.1.1). Por tanto, se puede considerar que la cantidad de agua reutilizada actualmente ($\approx 150 \text{ hm}^3$) es superior a la planteada en el PHCS (118 hm^3) para un horizonte de 20 años.

Agua desalada

La desalación de agua se ha planteado en los últimos años como una alternativa para aumentar los recursos hídricos de la deficitaria cuenca del Segura. En el PHCS (CHS, 1998) se cuantificaron en 40 hm^3 (desaladoras de Alicante I y San Pedro del Pinatar I) los recursos disponibles de agua desalada, todos ellos destinados a uso urbano. Una de las principales actuaciones del Programa AGUA (2004 - 2008) (Fig. 4.1.5) fue el incremento de recursos de agua desalada. El objetivo era incrementar los recursos de agua desalada a $323 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$, de los cuales 217 hm^3 están destinados a regadío y 106 hm^3 a consumo urbano (Tabla 4.1.1).

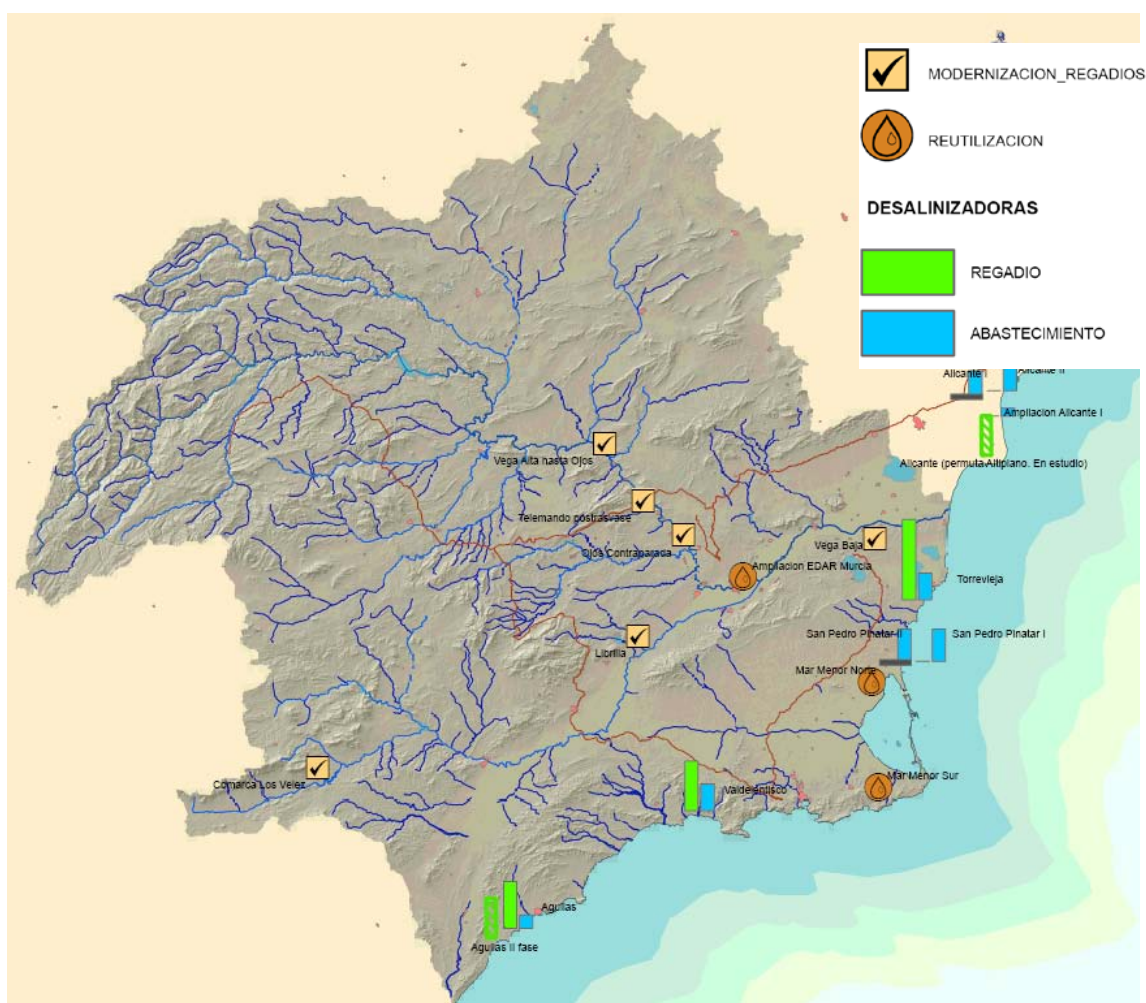


Figura 4.1.5. Actuaciones del programa AGUA en la cuenca del Segura para incremento de recursos hídricos. Fuente: Confederación Hidrográfica del Segura, Programa AGUA, 2006.

Tabla 4.1.1. Actuaciones del Programa AGUA en la cuenca del Segura para incremento de recursos hídricos (datos en hm³). Fuente: Confederación Hidrográfica del Segura, Programa AGUA, 2006.

Actuaciones del Programa AGUA. Incremento de recursos (hm ³)			
	Regadío	MCT	Total
REUTILIZACIÓN			
Mar Menor Norte	10		10
Mar Menor Sur	10		10
Ampliación EDAR Murcia	15		15
TOTAL	35		35
DESALINIZACIÓN			
Valdelentisco	37	20	57
El Mojón	4	0	4
Guardamar	20	0	20

4. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

Aguilas	30	10	40
Torrevieja	60	20	80
Ampliación Alicante I	0	8	8
Aguilas II fase	20	0	20
Alicante II	0	24	24
San Pedro Pinatar II	0	24	24
Alicante (permuta Altiplano. En	40	0	40
Ampliación Aguilas	0	6	6
TOTAL	217	106	323

Demandas

Urbana e industrial

La Mancomunidad de Canales del Taibilla (MCT), Organismo Autónomo adscrito al Ministerio de Medio Ambiente, se encarga de la distribución de la mayor parte del volumen de suministro urbano en la cuenca. De acuerdo con los datos de la Memoria de la MCT del año 2005, la demanda de abastecimiento en el ámbito de la cuenca asciende a $244,6 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$. Esta cifra va en aumento por el crecimiento de población y de actividades consuntivas, normalmente del sector terciario, y por los municipios que se están adhiriendo a la Mancomunidad.

La demanda industrial conectada al sistema de abastecimiento urbano se contabiliza dentro del total. En el año 2004 la MCT sirvió un total de $47,2 \text{ hm}^3$ para consumo industrial.

Las demandas que contemplaba el PHCS (CHS, 1998) eran 23 hm^3 de demanda industrial y 217 hm^3 para uso urbano. En el horizonte a 10 años del PHCS se esperaba que la demanda urbana ascendiera a 255 hm^3 y a 260 hm^3 para el horizonte de 20 años.

Agricultura

Las demandas agrarias para regadío en la CS identificadas en el PHCS (CHS, 1998) fueron de $1.661,6 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$, de los cuales $448,2 \text{ hm}^3$ están asignados a recursos no renovables (233 de bombeos no renovables y 215,2 a déficit de aplicación). En el documento de Seguimiento y Revisión del PHCS del año 2001 y el Plan Hidrológico Nacional se revisaron estas demandas, manteniéndose las demandas del PHCS en ambos casos. Estas demandas de regadío siguen siendo vigentes hoy en día ya que no ha habido opción de ampliar las superficies de riego. La superficie regada en la cuenca

según el informe de seguimiento del PHCS, asciende a 457.950 ha (269.029 ha netas), con un 5% de la superficie de riego fuera de la cuenca, siendo la dotación media por superficie regable neta en la Cuenca de $6.100 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$.

Medioambiental

En general, el río Segura posee unas buenas condiciones para el sostenimiento de la vida acuática en sus tramos de cabecera, e incluso en el curso medio. La situación se agrava a partir de la localidad de Ojós, y, sobre todo, a partir del azud de Contraparada. En este punto se produce una importante reducción de los caudales circulantes como consecuencia de la detracción para riegos, y comienzan a aportarse vertidos al río, procedentes de los asentamientos industriales y urbanos de las poblaciones ribereñas de las vegas media y baja. En consecuencia, después de los estudios pertinentes por parte de la CS, el PHCS estableció, con carácter general, un caudal mínimo a efectos medioambientales y sanitarios equivalente al 10% de la aportación media anual en régimen natural para el curso alto y afluentes del Segura con cauces permanentes. También estableció el sostenimiento de unos caudales mínimos de $3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, circulantes desde Ojós hasta Contraparada (Murcia), y de $4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ circulantes desde Contraparada hasta la Presa de San Antonio (Guardamar). Por otra parte existen unos requerimientos ambientales asociados a la conservación de los humedales evaluados por el PHCS en $60 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$, de los cuales $30 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$ se consideran consuntivos (20 de los cuales corresponden a los humedales protegidos).

Resumen de balance hídrico

La Fig. 4.1.6 presenta un resumen del balance hídrico de la CS contemplado en el PHCS (CHS, 1998). Las principales modificaciones a estas cifras presentadas en informes más actuales se resumen en la tabla 4.1.2. El total de recursos disponibles contabilizado en 1998 para el PHCS fue de 1.540 hm^3 . La actualización de datos con fuentes de información y estudios más recientes revela que los recursos de la cuenca siguen siendo aproximadamente similares ($1556,5 \text{ hm}^3$). Es importante señalar los orígenes de estos recursos se han modificado considerablemente, en especial, han aumentado notablemente los recursos de agua desalada y también la cantidad de agua reutilizada. Los recursos subterráneos disponibles se han reducido casi a la mitad y los datos de trasvases realizados muestran que la cantidad de agua trasvasa es muy inferior a la teórica esperada. En cuanto a las demandas, las cifras actuales no varían

4. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

significativamente respecto al PHCS (CHS, 1998). Por tanto, en la actualidad la CS mantiene el déficit estructural de 460 hm³ presentado en el PHCS (CHS, 1998).

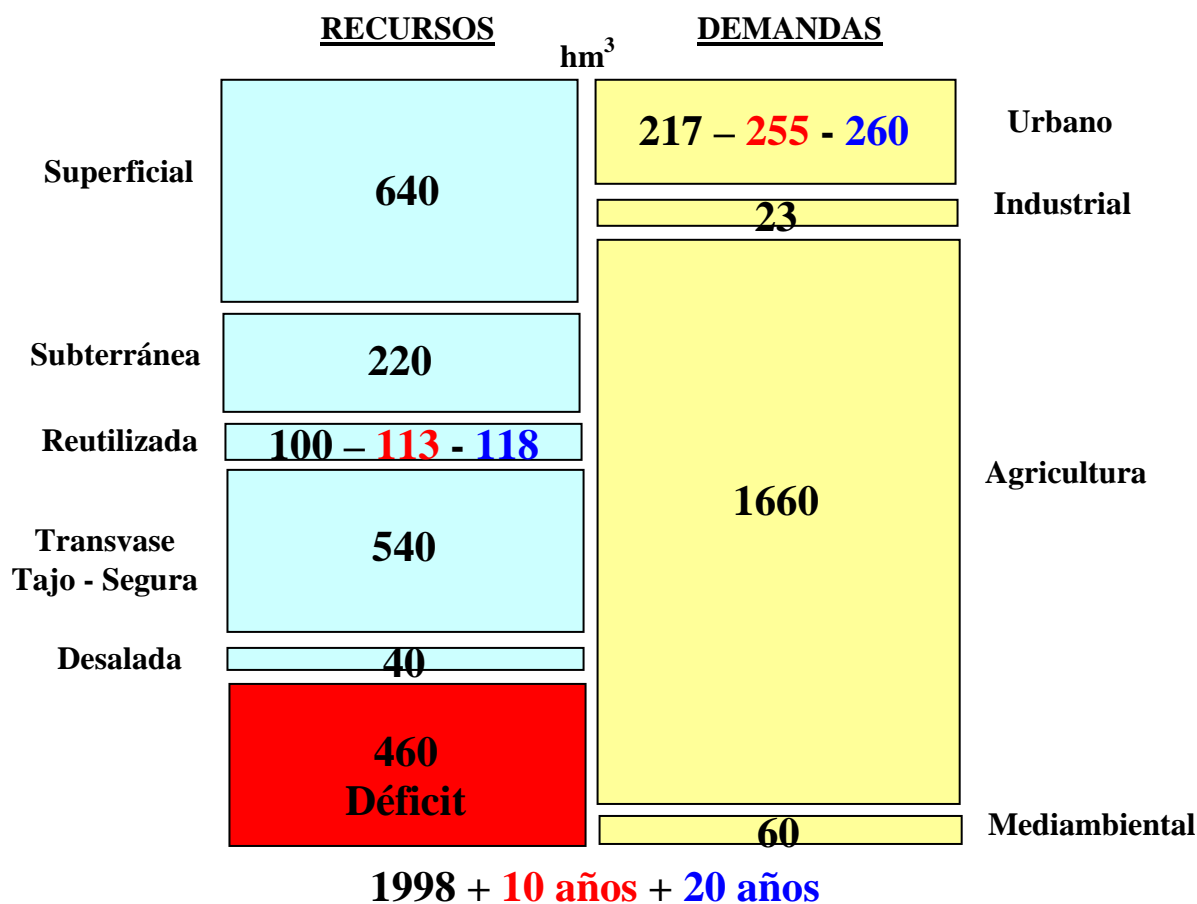


Figura 4.1.6. Balance hídrico de la Cuenca del Segura. Fuente: Plan Hidrológico de Cuenca del Segura PHCS (CHS, 1998).

Tabla 4.1.2. Actualización de datos del balance hídrico de la Cuenca del Segura del PHCS (CHS, 1998). con datos de planes y estudios posteriores

RECURSOS (hm ³)			DEMANDAS (hm ³)		
Tipo	PHCS (1998)	Est. posteriores al PHCS	Tipo	PHCS (1998)	Est. posteriores al PHCS
Superficial	640	650 (PASAESCS, 2006)	Urbano	217	197 (MCT, 2004)
Trasvasada	540	312 (SCRATS, 1979-2009)	Industrial	23	47 (MCT, 2004)
Subterránea	220	121,5 (PASAESCS, 2006)	Medioambiental	60	60 (PASAESCS, 2006)
Reutilizada	100	150 (AGUA, 2004-2009)	Agricultura	1660	1660 (PASAESCS, 2006)

4. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

Desalada	40	323 (AGUA, 2004-2009)			
TOTAL	1540	1556,5	TOTAL	1960	1964

Las líneas anteriores muestran la acusada escasez de agua en la CS, la cual ha sido recientemente seleccionada por el Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino como cuenca española piloto en materia de escasez de agua y sequía.

El marcado déficit hídrico estructural que presenta, 460 hm^3 que afecta a $2,7 \cdot 10^5$ ha de regadío (CHS, 2007), puede agravarse como consecuencia del cambio climático. El “*Intergovernmental Panel of Climate Change*” (IPCC, 2007) indica que los futuros cambios en la temperatura y en la precipitación en las cuencas mediterráneas, significarán (i) una reducción en la escorrentía y en la recarga de acuíferos, (ii) un incremento de la demanda hídrica y de las pérdidas de agua por evaporación desde almacenamientos de agua y (iii) un aumento de la ocurrencia e intensidad de las olas de calor y de periodos de sequía. Especialmente para la CS, las previsiones de los modelos de cambio climático para los escenarios 2030 y 2060 indican posibles reducciones del agua disponible de 16 y 28% e incrementos de temperatura ambiental de 1 y $2,5 \text{ }^\circ\text{C}$ respectivamente (Moreno et al., 2005). Estas variaciones supondrían incrementos de la evaporación de 3,1 y 7,7% para cada uno de los escenarios mencionados respectivamente.

Estas consideraciones finales justifican el interés de la adaptación de medidas para alcanzar un manejo adecuado y sostenible de las demandas y de los recursos hídricos en esta cuenca caracterizada por periodos de sequía recurrentes. Las principales medidas adoptadas por el Plan de Actuación en Situaciones de Alerta y Sequía en la CS, PASASCS (2006) son:

- Transferencia de agua desde otras cuencas.
- Transferencia de derechos de agua entre usuarios.
- Construcción de plantas desalinizadoras para incrementar los recursos hídricos.
- Reuso del agua tratada para la agricultura.
- Restricciones en el suministro de agua para riego.
- Modernización de los sistemas de riego para mejorar su eficiencia y reducir sus consumos de agua.

En este último apartado, se enmarcan todas las actuaciones referentes a la mejora de los sistemas de distribución de agua (sustitución de canalizaciones abiertas por conducciones subterráneas) y almacenaje con el objetivo de aumentar la eficiencia del uso del agua. Sin embargo, el análisis de incremento de la eficiencia del agua almacenada en balsas de riego ha sido poco estudiado. Entre la amplia variedad de técnicas que se han experimentado para reducir la evaporación de agua, el sombreado de balsas de riego mediante mallas de polietileno suspendidas ha resultado ser una técnica prometedora que permite reducir las pérdidas de agua por evaporación, aumentando la eficiencia del agua en estos almacenamientos. En este sentido, la Tesis doctoral de la doctora Belén Gallego Elvira presentada en 2010, *“Análisis de la evaporación en embalses de riego y de su reducción con coberturas de sombreado”*, permitió analizar la mejora de la eficiencia del uso del agua en almacenamientos mediante la reducción de la evaporación con la instalación de coberturas de sombreado suspendidas. Esta tesis sirve además como punto de partida de la tesis que ahora se presenta, *“Efectos de la aplicación de coberturas de sombreado suspendidas sobre balsas de riego”*, y que trata de dar respuesta a otros aspectos importantes del efecto de la instalación de una cobertura de sombreado, como son la mejora de la calidad del agua en balsas de riego y el estudio de procesos de formación natural de condensación de agua sobre superficies.

4.2. Balsas de riego

4.2.1. Necesidad de las balsas de regulación de riego

Actualmente las balsas de regulación son la construcción agraria más característica del sureste español. La CS se caracteriza por tener una gran cantidad de pequeñas balsas de riego que son un componente importante de los sistemas de distribución de agua y permiten amortiguar el desfase temporal que se produce entre la disponibilidad de los recursos y la demanda como consecuencia del servicio de las dotaciones de agua a los comuneros mediante turnos. Este desfase temporal es importante en las explotaciones agrícolas del sureste español, donde además existe una gran incertidumbre sobre las cantidades de agua disponible para riego, al depender ésta en gran parte de trasvases de otras cuencas.

La escala temporal de la regulación necesaria depende de los fines perseguidos, variando desde un año para regulación de cauces naturales, hasta unas pocas horas, cuando se pretende regular a lo largo del día el agua captada mediante pozos que sólo

trabajan en horas de tarifa eléctrica reducida. Para llevar a cabo una adecuada gestión hidráulica es preciso realizar correctamente la regulación de recursos hídricos con depósitos de dimensiones adecuadas a tal fin. La regulación de grandes cuencas hidrográficas, de carácter interanual, está asociada a la construcción de grandes presas (de decenas a cientos de hm^3). La regulación de zonas regables importantes, de carácter estacional, está relacionada con embalses de cierta entidad (hasta varios hm^3). Finalmente, para la regulación a nivel de sector de riego o parcela, de carácter diario o semanal, será suficiente con balsas de tamaño más pequeño (miles de m^3).

Para pequeños volúmenes de agua almacenada utilizados principalmente para el suministro de explotaciones agrícolas, se construyen almacenamientos de poca profundidad, con taludes en tierra impermeabilizados mediante geomembranas, popularmente conocidos como balsas de riego. Estas ofrecen notables ventajas frente a otras soluciones como las obras de hormigón, de fábrica o de mampostería (bajo coste, rápida construcción y sencillez de trámites administrativos). Las balsas de riego se encuentran al alcance técnico y económico de pequeños propietarios o pequeños grupos de agricultores y pequeñas y medianas empresas agrarias, por lo que su uso se ha extendido amplia y rápidamente durante los últimos años en el sureste español.

En la CS, Martínez-Alvarez et al. (2008) identificaron 14.145 embalses, con un área total de 4901 ha, equivalente al 0,26% del total de la superficie de la cuenca y al 1,81% de la superficie total de regadío en la cuenca. Además observaron que las balsas se concentraban sobre todo en el este de la cuenca (valle del Río Guadalentín, valle del Río Segura y en el plano costero), donde la productividad de la agricultura de regadío es más elevada (Fig. 4.2.1).

En cuanto al tamaño de los almacenamientos cabe señalar que el tamaño más frecuente (más del 75%) oscila entre 0,05 y 0,5 ha. Los balsas con una superficie menor a 0,1 ha corresponden a balsas de uso individual de cada explotación, mientras que aquellas de más de 0,5 ha (0,5 a 5 ha) suelen ser almacenamientos de agua colectivos (Comunidades de Regantes y Confederación Hidrográfica) que distribuyen agua a las pequeñas balsas de las explotaciones (Fig. 4.2.2). La Fig. 4.2.3 muestra un pequeño recorte (aprox. 100 ha) de la fotografía aérea de la CS del vuelo SIGPAC 2003, que representa la estampa típica de las zonas de riego del sureste español, donde abundan las balsas de riego (puede observarse como cada pequeña explotación tiene su propia balsa).

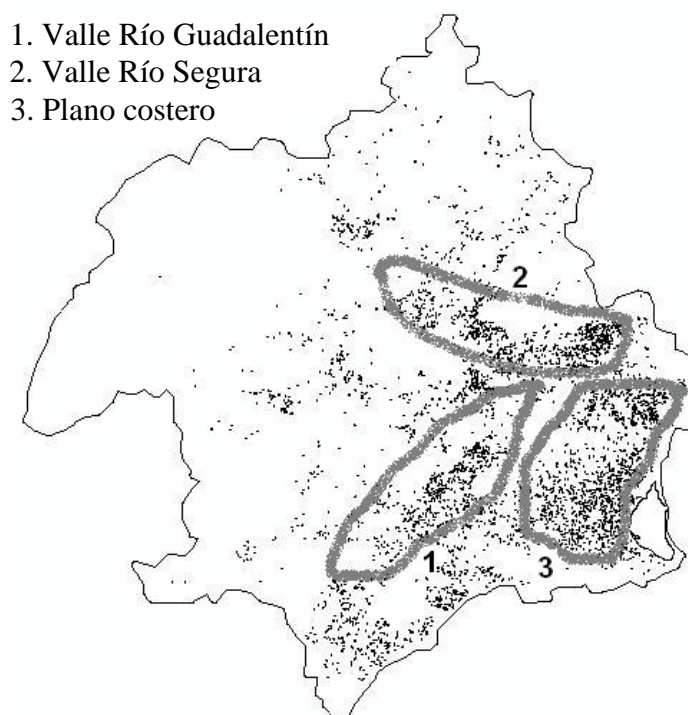


Figura 4.2.1. Distribución espacial de balsas en la Cuenca del Segura. Fuente: Martínez-Alvarez et al. (2008).

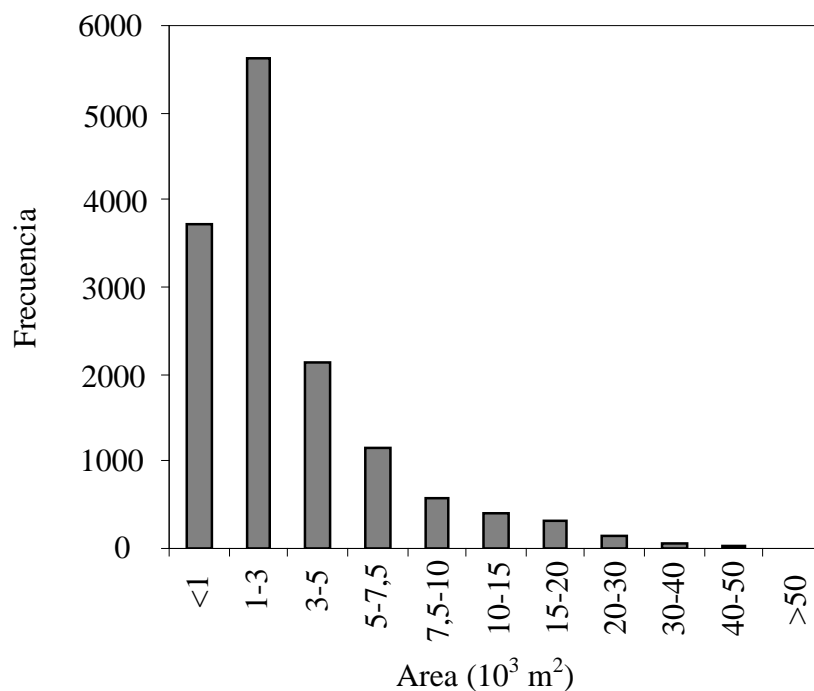


Figura 4.2.2. Frecuencia de las balsas de riego en función de su tamaño en la Cuenca del Segura. Fuente: Martínez-Alvarez et al. (2008).

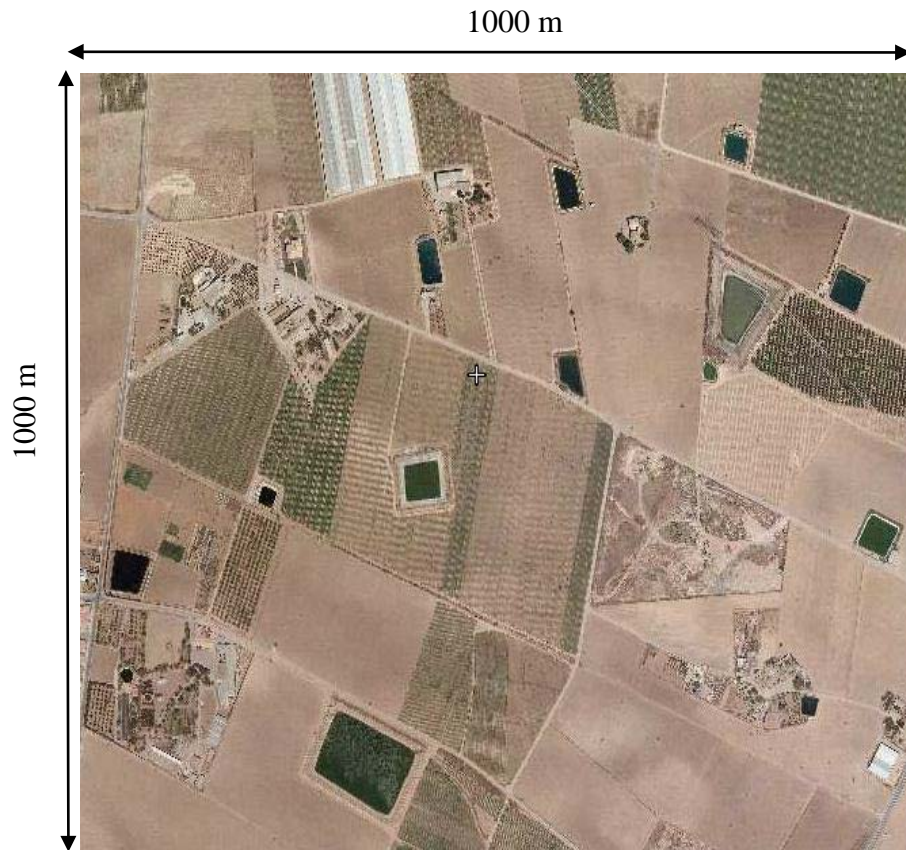


Figura 4.2.3. Recorte de la fotografía aérea del vuelo SIGPAC 2003. Estampa característica de zonas de regadío de la cuenca del Segura con abundantes balsas de riego.

Las balsas de riego se pueden clasificar atendiendo al tipo de regulación realizada y también pueden señalarse otros usos adicionales:

- Regulación estacional. El agua se almacena cuando los recursos hídricos superan a la demanda de la zona de cultivo, para poder ser utilizada cuando ocurre lo contrario. La capacidad de la balsa debe ser suficiente para asegurar que se cubren las necesidades hídricas de los cultivos de la zona regable durante el periodo crítico.
- Regulación funcional. Se utilizan para el ajuste temporal entre demandas de cultivos y distribución de recursos. Las comunidades de regantes que reciben esporádicamente grandes cantidades de agua que deben distribuir de forma continuada, necesitan disponer de balsas de riego para almacenar los recursos, por ejemplo cuando se conceden trasvases de otras cuencas. En comunidades con sistemas de distribución de recursos por turnos, los regantes a su vez deben de disponer también de una balsa funcional que les permita almacenar su dotación de riego, para regular su consumo hasta el próximo turno de riego.

- Reserva de seguridad. Existen balsas cuyo fin es garantizar la supervivencia del cultivo ante cualquier fallo en las instalaciones de suministro de agua o ante de periodos de escasez no previstos. Es un caso frecuente en cultivos asociados a inversiones importantes como los cultivos leñosos. También es común en caso de que el suministro dependa de captaciones subterráneas, para tener cubierta la demanda en caso de averías en los sistemas de bombeo.
- Dominio de cota. Las balsas de riego se sitúan en zonas elevadas respecto de las tierras a regar, para disponer de presión en la red de riego sin necesidad de contar con estaciones de bombeo para inyección directa a red.
- Oxigenación y decantación. El agua de riego, en función de su origen, puede contener químicos que en presencia de oxígeno precipiten en forma de sales, como es el caso de los iones de hierro, azufre, manganeso o sílice, cuya concentración puede disminuir de 1 a 5 ppm hasta 0,1 ppm tras su almacenamiento temporal en balsas. En el caso de aguas procedentes de depuración, también se pueden conseguir disminuciones adicionales en el contenido de bacterias. Para aguas de ríos y arroyos, el periodo de almacenamiento sirve para la decantación de sólidos en suspensión.
- Mezcla. En muchas ocasiones los agricultores tienen acceso a distintas fuentes de abastecimiento con diferentes calidades de agua. Las balsas pueden ser utilizados para mezclar aguas de diferente calidad con el fin de incrementar la disponibilidad de recursos. Por ejemplo, es común la mezcla de aguas de alta calidad procedentes de trasvases con agua salinas de pozos.

4.2.2. Pérdidas de agua por evaporación

Las balsas de riego experimentan pérdidas de agua por dos motivos principales: filtraciones y evaporación.

Las balsas de riego están sujetas a pérdidas de agua por filtraciones a través de la plataforma y los taludes del vaso como consecuencia de una compactación deficiente de las tierras o por roturas de la geomembrana de impermeabilización. Este problema ha sido ampliamente solventado mediante el uso de materiales naturales (arcillas) o geomembranas sintéticas (policloruro, polietileno,...) que permiten garantizar la impermeabilidad de la balsa. Por el contrario, apenas existen estudios sobre las posibles

técnicas para minimizar las pérdidas por evaporación y los niveles de eficiencia que se pueden alcanzar.

La importancia de las pérdidas de agua por evaporación depende de las características de la balsa y de su funcionamiento. Para el caso de balsas de riego impermeabilizadas, caracterizadas por su escasa profundidad y su función de reserva, estas pérdidas pueden llegar a suponer un porcentaje importante sobre el volumen que regulan y hacer que la eficiencia de distribución se reduzca sobre todo en regiones áridas y semiáridas (Hudson, 1987).

Martínez-Alvarez et al. (2008) evaluaron la evaporación de agua desde pequeñas balsas de riego en la CS (sureste de España). Ellos determinaron unas pérdidas de agua a escala regional de aproximadamente de 58 hm^3 desde las balsas de riego existentes en la cuenca. La figura 4.2.4 muestra la distribución espacial de las pérdidas de agua anuales por evaporación desde las balsas de riego por zonas hidrológicas de la Cuenca del Segura. Craig et al. (2005) estimaron la evaporación anual desde las balsas de riego localizadas en Queensland (Australia) en 1000 hm^3 para un total de volumen de agua almacenado de 2.500 hm^3 . Gökbülak y Özhan (2006) analizaron las pérdidas por evaporación de lagos y grandes embalses en Turquía, e indicaron que eran bastante superiores al agua consumida en usos domésticos e industriales, representando un quinto del agua usada para riego. Finalmente, Ngigi et al. (2005) y Mugabe et al. (2003) también identificaron las pérdidas de agua por evaporación desde balsas de riego localizadas en Zimbawe y Kenia.

Por esta circunstancia, a pesar de los importantes esfuerzos técnicos y económicos que se están realizando para mejorar la eficiencia de aplicación del agua en parcela, las eficiencias globales del sistema siguen siendo mejorables y los esfuerzos se deben centrar en minimizar las pérdidas de agua por evaporación sobre todo en regiones áridas y semiáridas donde los recursos hídricos son escasos.

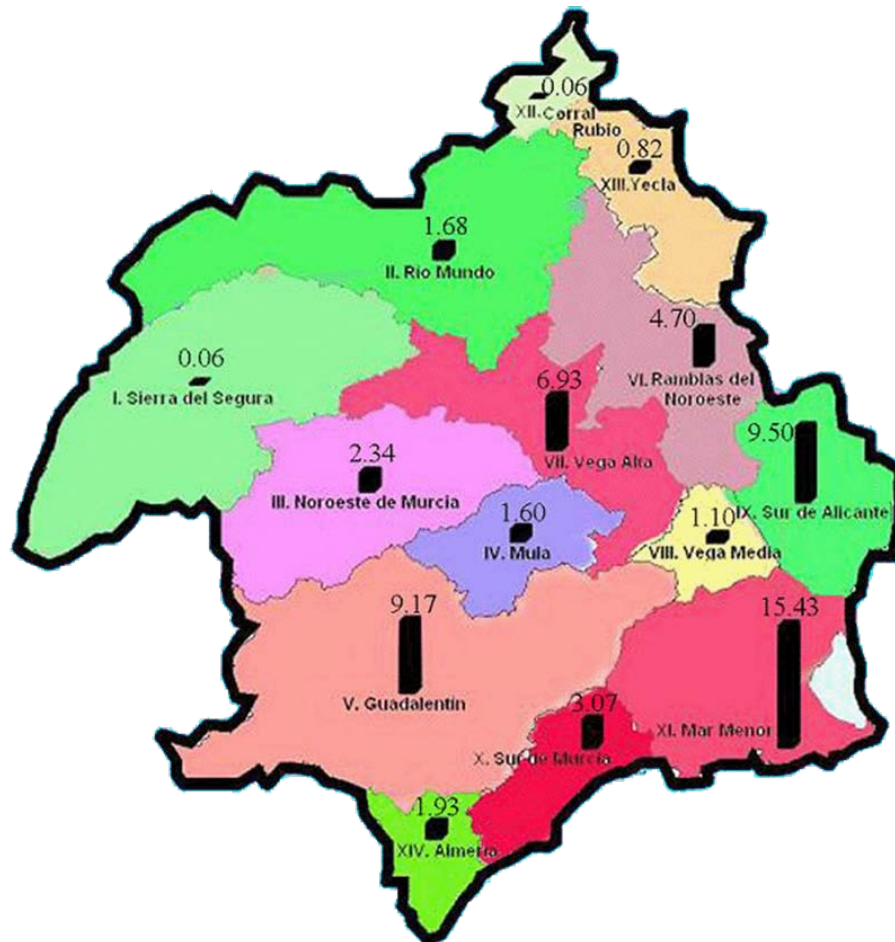


Figura 4.2.4. Distribución espacial de las pérdidas anuales de agua por evaporación (hm^3) desde las balsas de riego existentes en la Cuenca del Segura. Distribución por zonas hidrológicas.

4.2.3. Prevención de la evaporación

En las últimas décadas, se han propuesto diferentes opciones para prevenir las pérdidas por evaporación en balsas. Brown (1988) clasificó en cuatro grupos las posibles técnicas de reducción de evaporación:

- Métodos físicos. Se basan en la alteración de las propiedades físicas del agua, como el cambio del color para modificar el albedo (Cooley, 1983) o la desestratificación artificial del agua (Koberg y Ford, 1965).
- Métodos operacionales. Hacen referencia a la gestión y manejo de balsas. Cuando se dispone de varios pequeños embalses, buenas prácticas orientadas a la reducción de la evaporación son el consumo preferente del agua de aquellos que tengan mayor temperatura, o evitar tener varias balsas a baja capacidad, concentrando los recursos en sólo uno para minimizar la superficie expuesta a evaporación.

- Métodos químicos. Determinadas capas químicas sobre la superficie del agua limitan el fenómeno de evaporación. Los monolayers, como el cetil alcohol o stearyl alcohol, son químicos que se extienden espontáneamente sobre la superficie del agua creando una cobertura que reduce la evaporación (10 - 40% de reducción, Craig et al., 2005). Son una solución económica y adaptable a balsas de grandes dimensiones, pero presentan varios inconvenientes que reducen su eficiencia, como el arrastre por el viento o la rápida biodegradación de la cobertura química (Barnes, 2008).
- Métodos estructurales. Incluyen todas las estructuras físicas de cobertura de balsas. Entre ellas están las coberturas o módulos flotantes (Daigo y Phaovattana, 1999) y las coberturas de sombreado (Martínez-Alvarez et al., 2006), que minimizan los intercambios de masa y energía entre la superficie de agua y el aire alrededor, consiguiendo reducir la evaporación más de un 80% (Craig et al., 2005). También se incluyen en este grupo los cortavientos que protegen la superficie del agua de la acción del viento (Hipsey y Sivapalan, 2003).

Entre todas estas alternativas, una de las más prometedoras y adaptable a balsas de riego es el uso de coberturas de sombreado suspendidas. Esta técnica se describe a continuación.

4.2.4. Coberturas de sombreado suspendidas

Este método consiste en la cobertura de la balsa de riego con una malla de sombreado fabricada en polietileno de doble capa que se sustenta sobre una estructura reticular formada mediante cables de acero o poliamida (Martínez-Alvarez et al., 2009). Cuando la dimensión lateral de la balsa supera los 100 metros, se puede recurrir a la instalación de columnas de apoyo intermedio. La malla de sombreado es permeable al agua y reduce la transmisión de la radiación solar (reducción 99%) y minimiza el efecto del viento (reducción 92%).

Existen diferentes disposiciones para la sustentación de la cobertura, así como varias opciones de anclaje. Las dos disposiciones más habituales son:

- Disposición 1 (Fig. 4.2.5.a). La estructura consta de una retícula doble de cable, donde se introduce una doble capa de malla de sombreado. Los cables se atan a un tubo perimetral de acero soportado por perfiles que se empotran en una viga perimetral solidaria con la vía de coronación. La estructura tiene una capa inferior formada por una retícula cuadrangular de cables, y una capa superior de

retícula igual a la inferior y coincidente con ella, de modo que ambas retículas que conforman la estructura resistente se unen entre sí mediante grapas alternas.

- Disposición 2 (Fig. 4.2.5.b). Consiste en una retícula de cables de sustentación formada por tres niveles, un primer nivel por debajo de la malla de sombreo, otro segundo nivel colocado por el medio de dicha malla y un tercer nivel de cables situado por encima de la malla. Los cables se atan a un tubo perimetral de acero soportado por perfiles que se empotran en una viga perimetral solidaria con la vía de coronación. La primera red es de soporte y sustentación, sirviendo de apoyo a la malla de sombreo, los cables colocados por el interior de la malla de sombreo también sirven de sustentación y la red superior por encima de la malla protege contra la succión del viento.

En cuanto al anclaje se plantean las siguientes opciones:

- Anclaje por tubo perimetral y pozos de cimentación (Fig. 4.2.6.a).
- Anclaje por tubo perimetral en coronación de muro de hormigón (Fig. 4.2.6.b).
- Apoyo en tubo perimetral compensado con muertos de anclaje (Fig. 4.2.6.c).

A continuación se resumen algunos resultados experimentales de ensayos realizados recientemente con Coberturas de Sombreo Suspendidas (CSSs). Craig et al. (2005) evaluaron la eficiencia técnica de una CSS en una balsa poco profunda (superficie = 3,8 ha, profundidad = 3 m) localizada en Queensland (Australia), donde la demanda evaporativa es sumamente elevada (2.200 mm año⁻¹).

Estos investigadores obtuvieron factores de reducción de la evaporación cercanos al 87% durante los meses estivales. En el sureste de España, bajo condiciones de clima semiárido, Martínez-Alvarez et al. (2006) realizaron un ensayo experimental con diferentes materiales porosos a escala de tanque Clase A con el fin de determinar que material de sombreo era más eficiente en la reducción de la evaporación. Los textiles evaluados fueron: polietileno blanco de simple (WPE) y doble capa (2WPE), polietileno negro de simple (BPE) y doble capa (2BWPE), polietileno negro de una capa (GPE), polietileno azul de una capa (BLPE) y textil de polietileno aluminizado (ALU).

El factor de reducción (f_R) conseguido por cada material se muestra en la Tabla 4.2.1. El material más eficiente fue el polietileno negro de doble capa ($f_R = 83,5\%$).

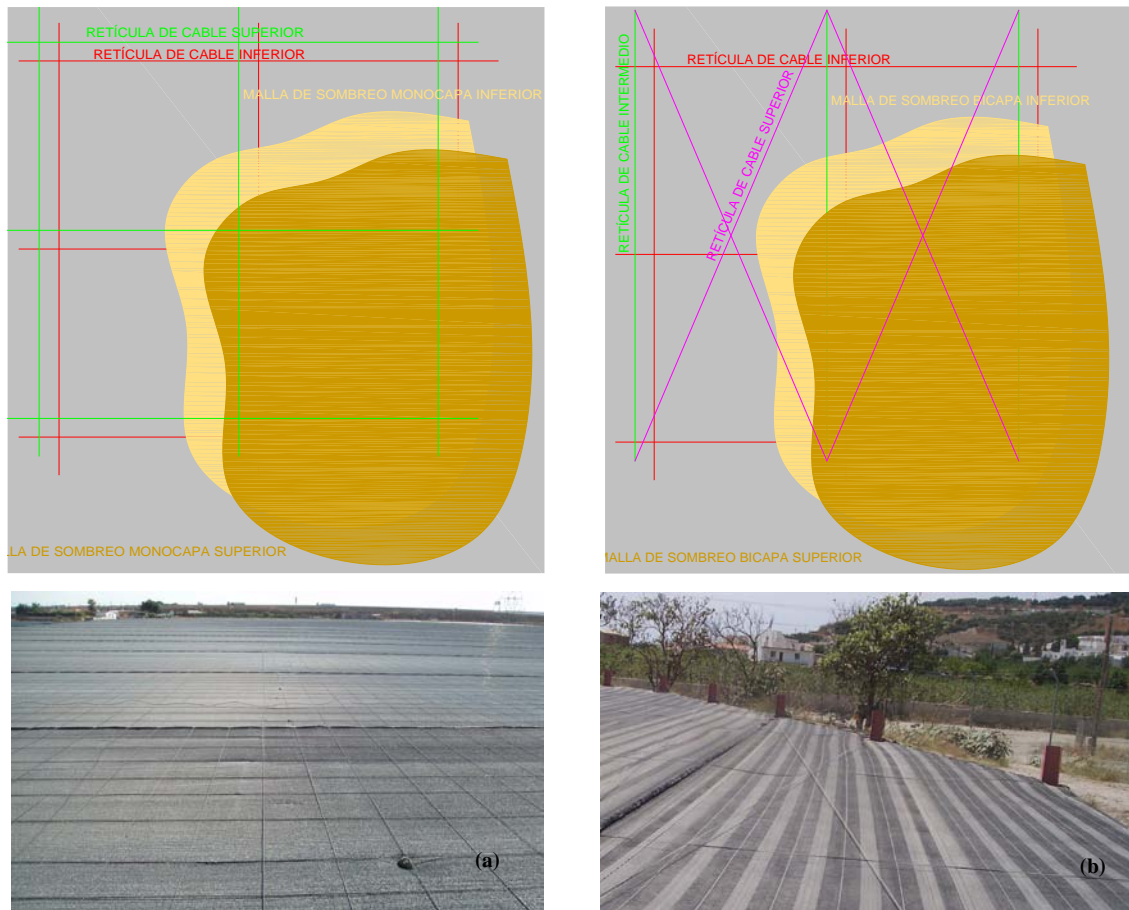


Figura 4.2.5. Tipos de coberturas suspendidas: (a) de retícula doble; (b) de tres niveles de cableado.



Figura 4.2.6. Tipos de anclaje con tubo perimetral para coberturas suspendidas: (a) con pozos de cimentación; (b) con muro de hormigón; (c) con muertos de anclaje.

Este material fue seleccionado para la cobertura del embalse experimental empleado en esta tesis. Recientemente, Gallego-Elvira et al. (2011) analizaron los efectos de la instalación de esta CSS sobre una balsa de riego localizada en el sureste de España y observaron factores anuales de reducción de la evaporación del 85%.

4. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

Tabla 4.2.1. Eficiencia de reducción de la evaporación (f_R) de varios materiales de sombreo. Fuente: Martínez-Alvarez et al. (2006)

Shading material	f_R (%)	S.D. (%)
WPE	54,7	$\pm 1,7$
2WPE	68,5	$\pm 2,5$
BPE	75,1	$\pm 5,8$
2BPE	83,5	$\pm 2,3$
GPE	76,2	$\pm 7,3$
BLPE	77,6	$\pm 2,2$
ALU	51,5	$\pm 1,7$
S.D.: standard deviation		

La instalación de CSSs sobre balsas de riego presenta como beneficio adicional su efecto positivo en la calidad del agua almacenada (Craig et al., 2005; Finn y Barnes, 2007). La CSS minimiza la radiación solar incidente en la masa de agua y limita la fotosíntesis y por tanto el crecimiento y desarrollo de algas, previniendo así los posibles problemas de obturaciones de emisores en los sistemas de riego localizado (Ravina et al., 1992; Karico, 2000). La instalación de la cobertura también reduce la entrada de suciedad y partículas arrastradas por el viento. Además, el cambio en el balance de agua entre la evaporación y la precipitación puede mejorar la calidad del agua mediante la reducción de la concentración de sales solubles en el agua almacenada (Martínez-Alvarez et al., 2009). Uno de los objetivos de esta tesis es por tanto el estudio de los efectos de la aplicación de una cobertura de sombreo en la calidad del agua de una balsa de riego.

4.2.5. Calidad del agua para riego y efectos de su almacenamiento

La calidad del agua y su disponibilidad para la agricultura son dos aspectos importantes a tener en cuenta, sobre todo en regiones áridas y semiáridas donde la prolongada situación de escasez de agua conlleva la utilización de aguas de diferentes procedencias; superficial, subterránea, regeneradas y desaladas. Palacios y Acebes (1970) señalan que el término calidad del agua se utiliza ampliamente para indicar la conveniencia o idoneidad del agua para los diferentes usos: consumo humano, usos recreativos y riego.

Históricamente, la calidad del agua para riego se ha determinado en función de la cantidad de sales en el agua, de modo que aguas con una alta salinidad (elevada conductividad eléctrica) podían causar problemas en el crecimiento de los cultivos (Ayers y Westcot, 1985). Actualmente, las modernizaciones de los regadíos hacia el riego localizado realizadas durante en los últimos años en la CS, con el objetivo de incrementar la eficiencia del uso del agua, han incrementado la importancia de los parámetros físicos y biológicos del agua. Su estudio permite el uso de aguas de mejor calidad que aseguren un buen funcionamiento de los sistemas de riego localizado, ya que el uso de un agua de baja calidad (elevada concentración de algas y sólidos en suspensión) incrementa las necesidades de filtrado y el coste económico del riego (más agua y energía) y aumenta la posibilidad de la aparición de obturaciones en emisores del sistema de riego localizado afectando a la uniformidad de riego en parcela. Actualmente, no existe ninguna legislación que regule los niveles de presencia de algas, oxígeno disuelto, sólidos en suspensión y sales del agua destinada a usos agrícolas. La única legislación que en cierto modo regula algunos aspectos de calidad del agua en la agricultura es el REAL DECRETO 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. En el Anexo I del citado decreto se especifican los criterios de calidad para la reutilización de las aguas según sus usos, e indica los valores máximos admisibles de E-coli, nematodos intestinales, sólidos en suspensión y turbidez en el agua de riego.

Los principales parámetros de calidad del agua físico-biológicos se describen a continuación.

Temperatura del agua

La temperatura del agua es un factor físico de calidad fácilmente medible que debe ser analizado pues tiene efectos sobre una gran variedad de parámetros de calidad del agua. Por ejemplo, cuando la temperatura del agua aumenta, la solubilidad de los gases disminuye (menor capacidad de retener oxígeno en el agua) y la solubilidad mineral incrementa.

La mayoría de los organismos dependen estrechamente de la temperatura del agua para crecer, desarrollarse y respirar. Por tanto variaciones de la temperatura que sobrepasen los rangos tolerados tienen consecuencias sobre ellos (Deas et al., 2000). Además, la temperatura del agua influye tanto en las reacciones químicas como

4. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

biológicas y en los cambios de densidad, provocando movimientos de agua por convección (Dolz et al., 1995).

Es frecuente observar en grandes masas de agua de gran profundidad (más de 10 m) un fenómeno llamado estratificación donde las capas superficiales se encuentran a una temperatura más elevada que las capas más profundas. En primavera, tanto la temperatura como la densidad del agua en todas las profundidades son similares, por lo que hay muy poca resistencia al mezclado y sólo se requieren pequeñas cantidades de energía eólica (efecto del viento en superficie que provoca el oleaje) para mezclar la columna de agua. Conforme avanza la primavera, las aguas superficiales de los almacenamientos se calientan más rápidamente que el calor distribuido por mezclado. Las aguas superficiales reducen su densidad con el aumento de su temperatura y la resistencia termal relativa al mezclado se incrementa marcadamente. A partir de este momento la columna de agua se divide en tres regiones, las cuales exceden la resistencia al mezclado entre ellas: (1) epilimnium correspondiente a la zona superior a mayor temperatura, (2) metalimnion correspondiente a la zona intermedia de transición entre la zona superior más caliente y la inferior más fría que exhibe una marcada discontinuidad termal y (3) hipolimnion correspondiente a la zona profunda de temperatura más fría. Al finalizar el verano la disminución de la temperatura del aire y las primeras precipitaciones otoñales generan una pérdida calor al embalse que excede a la entrada de calor por energía solar. Las aguas superficiales se vuelven más frías que las subyacentes, por lo que descienden y ocurre una mezcla por combinación de corrientes de convección y circulación inducida por el viento (Wetzel, 2001).

Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica del agua de riego es un indicador de la capacidad del agua para transmitir una corriente eléctrica. La conductividad es un parámetro que permite estimar de forma rápida la concentración de sólidos disueltos (salinidad) en el agua. Depende de los aniones (cloruro, nitrato, sulfato y fosfato) y de los cationes (sodio, magnesio, calcio, hierro y aluminio) presentes en el agua y de la temperatura del agua de modo que a mayor temperatura, el agua presenta una mayor conductividad (Romero-Rojas, 1999).

Una elevada salinidad en el agua de riego puede tener efectos dañinos sobre los cultivos ya que puede afectar al crecimiento y desarrollo de las plantas y disminuir su productividad cuando sobrepasa los umbrales específicos de cada cultivo (Ayers y

Westcot, 1985). En agricultura, una correcta determinación de la conductividad eléctrica del agua de riego es fundamental. En almacenamientos de agua destinados a regadío, localizados en regiones áridas y semiáridas, el problema de la salinidad del agua es si cabe más importante. La escasez junto con la baja calidad en el suministro del agua y las altas tasas de evaporación conducen a un balance negativo entre precipitación y evaporación e inducen a un incremento continuo de la salinidad en las balsas de riego.

Estudios recientes indican que en un sistema de producción de pimentón bajo invernadero, la producción se redujo aproximadamente un 12% cuando la conductividad eléctrica del agua de riego se incrementó desde 0,50 hasta 3,20 mS cm⁻¹ cuando se cultivó en arena y desde 0,70 hasta 2,40 mS cm⁻¹ cuando se cultivó en toba volcánica (Ben-Gal et al., 2008). Kamal (2010) observó una reducción de la producción de maíz del 45% cuando la conductividad eléctrica del agua se incrementó desde 0,87 hasta 4,73 mS cm⁻¹.

Oxígeno disuelto

La concentración de oxígeno disuelto (OD) en el agua es resultado del equilibrio de varias componentes. Por un lado, las entradas de OD en el agua de una balsa provienen de la fotosíntesis de las plantas acuáticas y de los procesos de difusión de aire en la capa superficial por del viento y del oleaje (Gladyshev et al., 2002). Por otro, las salidas de oxígeno se deben a la respiración de los organismos acuáticos y a la descomposición aerobia de la materia orgánica (Martín et al., 1999). Cuando la concentración de OD en el agua es inferior a la saturación, se produce una gradiente de oxígeno desde la atmósfera hacia el seno del agua, penetrando mediante un proceso de difusión. Cuando el equilibrio no puede ser restituido, los niveles de OD pueden disminuir considerablemente hasta alcanzar umbrales que pueden ser perjudiciales para los cultivos.

El OD en el agua de riego puede ser un factor limitante en algunos sistemas de agricultura intensiva (Bhattarai et al., 2005; Marfà et al., 2005; Raviv et al., 2004). Una baja concentración de oxígeno en el agua de riego puede tener provocar deficiencias de oxígeno en la raíz que pueden provocar problemas agronómicos como estrés, crecimiento y desarrollo lento del cultivo y pérdidas de producción. Además un nivel reducido de OD en el agua de riego puede provocar la aparición de enfermedades (Chérif et al., 1997).

Morard (1995) indicó que en cultivo hidropónico el nivel umbral mínimo para no producir efectos dañinos sobre los cultivos es de 3 mg L^{-1} (equivalente a una presión parcial entre 4 y 6%). Sin embargo, Bonachela et al. (2010) cultivó tomate en lana de roca y regó con agua con concentraciones de OD de 5 mg L^{-1} durante la mayor parte del experimento y menores a 3 mg L^{-1} durante algunos periodos y no observó reducciones en la producción.

Ante situaciones de baja concentración de OD en el agua de riego, algunos investigadores han propuesto algunas soluciones. Entre ellos, Goorahoo et al. (2001) y Huber (2000) evaluaron la oxigenación del agua mediante la aplicación de peróxido de hidrógeno y mediante la instalación de inyectores de aire venturi en los laterales de riego. Además, estos investigadores observaron incrementos de productividad de cultivos cuando se riega con agua enriquecida en OD.

Algas y turbidez

Bajo condiciones climáticas adecuadas, la gran cantidad de nutrientes que almacenan las balsas de riego en el agua, permite el crecimiento y desarrollo de algas de tamaño microscópico que pueden provocar serios problemas de calidad (Karico, 2000; Brainwood et al., 2004; Sperling et al., 2008). Este desarrollo de algas, incrementa la concentración de materia particulada en suspensión aumentando la turbidez del agua e impidiendo la penetración de la radiación solar a las capas más profundas. La turbidez se define como la falta de transparencia del agua debida a la presencia de partículas en suspensión de modo que cuantos más sólidos en suspensión haya en el agua, más sucia parecerá ésta y más alta será la turbidez. Ante la dificultad de determinar la concentración de algas en el agua y puesto que las algas son organismos fotoautótrofos, es habitual la determinación de la clorofila – a como indicador de la presencia de algas.

La prolifерación de algas en el agua almacenada en una balsa de riego reduce considerablemente la calidad del agua de riego, sobre todo cuando se destina a un sistema de riego localizado.

Los sistemas de riego localizado se componen de un gran número de emisores localizados en superficie a lo largo de los laterales de riego. Estos emisores tienen aberturas estrechas por donde el agua fluye durante el riego y son propensos a desarrollar obturaciones por partículas físicas, químicas y biológicas presentes en el agua (Ravina et al., 1992). Estas obturaciones de los emisores afectan principalmente a la uniformidad de aplicación de agua de riego en parcela, lo cual provoca que emisores

obturados suministren un menor volumen de agua y se produzcan variaciones en el crecimiento y reducciones en la productividad del cultivo (Adin et al., 1989; Adin y Sacks, 1991; Bucks y Nakayama, 1991).

Para asegurar el buen funcionamiento de un sistema de riego localizado, además del uso de un agua de buena calidad con una baja concentración de sólidos en suspensión (algas y materia inerte particulada), los sistemas de riego localizado disponen de un cabezal de riego donde el agua se filtra para eliminar la mayor parte de las partículas en suspensión. Cuando se riega con aguas de baja calidad, los requerimientos de filtrado aumentan como consecuencia de la mayor carga de partículas en suspensión, con el correspondiente aumento en el gasto de agua y de energía para llevarlo a cabo. Es habitual que aunque se realice este filtrado previo al riego, existen algas capaces de pasar a la instalación de riego y producir obturaciones en los emisores, provocando posibles variaciones en la uniformidad de aplicación del agua en parcela que pueden tener efectos negativos sobre los cultivos.

Por tanto, es de especial interés en la CS (región de estudio), con un marcado déficit hídrico y numerosas balsas de riego, el estudio tanto de la magnitud de pérdidas por evaporación, como el análisis de la calidad del agua en almacenamientos para tratar de desarrollar técnicas alternativas que minimicen ambos efectos.

4.2.6. Técnicas para mejorar la calidad del agua en balsas

Actualmente, los tratamientos para mejorar la calidad del agua en balsas de riego tienen básicamente la finalidad de controlar el crecimiento y desarrollo de algas en la balsa para evitar problemas posteriores por obturaciones de emisores durante el riego. Los tratamientos principales que se emplean se estructuran en (i) aplicación de sustancias químicas denominadas algicidas tales como sulfato de cobre, quelatos, hipoclorito sódico o permanganato potásico que en una concentración adecuada previenen el desarrollo de cualquier clase de alga, pero contribuyen al aumento de la concentración de sales en la balsa, (ii) uso de tecnología de ultrasonidos que provoca la implosión de la vacuola celular (cavitación acústica) de las algas y por tanto su muerte y (iii) instalación de sistemas de sombreado que reducen la incidencia de la radiación solar limitando los procesos de fotosíntesis (muerte del alga) y reduciendo los efectos del viento.

Una parte importante de esta tesis se centra en el estudio del efecto de la aplicación de las CSSs (anteriormente descritas en el epígrafe 4.2.4) como técnica para mejorar la calidad del agua en balsas de riego.

Resultados de ensayos experimentales indican que la limitación de los procesos de fotosíntesis de las algas al instalar la CSS tienen el potencia de reducir significativamente el coste de tratamiento de agua potable (Finn y Barnes, 2007). En el sureste de Australia se cubrió con una CSS una balsa de riego con agua potable depurada y una balsa de riego con agua sin depurar y se observó una reducción de la concentración de algas de 98,2 y 86,5% respectivamente. Chen et al. (2009) observaron al término de los primeros 6 días después de la instalación de una CSS de doble capa en una balsa de riego pequeña (560 m³) en condiciones de eutrofización, reducciones de la concentración de algas del 81%.

A pesar de estas ventajas de mejora de la calidad del agua, algunos investigadores han detectado fuertes reducciones de OD en balsas cubiertas. Maestre-Valero et al. (2009) compararon tres balsas de riego de características similares, dos de ellas descubiertas y una cubierta y observaron concentraciones de oxígeno típicas de situaciones de hipoxia (2 mg L⁻¹) en la balsa cubierta mientras que no observaron este fenómeno en las balsas descubiertas donde la concentración de OD se mantuvo próxima a la saturación (8 mg L⁻¹). Bonachela et al. (2007) también observó valores muy reducidos de OD en balsas de riego cubiertas suministradas con agua residual tratada.

El OD en el agua de riego puede ser un factor limitante en algunos sistemas de agricultura intensiva (Bhattarai et al., 2005; Marfà et al., 2005; Raviv et al., 2004). Una baja concentración de oxígeno en el agua de riego puede provocar deficiencias de oxígeno en la raíz que pueden ocasionar problemas agronómicos como estrés, crecimiento y desarrollo lento del cultivo y pérdidas de producción. Además un nivel reducido en el agua de riego puede potenciar la aparición de enfermedades (Chérif et al., 1997). Una evaluación de la evolución de la concentración de OD en el agua de riego en su tránsito por todas las etapas de un sistema de riego localizado es necesaria con el fin de analizar si este sistema es capaz de re-oxigenar el agua hasta concentraciones no perjudiciales para las plantas.

Las líneas anteriores ponen de manifiesto que la identificación y valoración de los efectos que produce la instalación de una CSS sobre la calidad del agua resulta de notable interés, dada su incidencia sobre aspectos agronómicos y técnicos del riego agrícola.

4.3. Condensación de rocío

4.3.1. El ciclo del agua

El ciclo hidrológico o ciclo del agua se define como el proceso de circulación del agua entre los distintos compartimentos de la hidrosfera (Fig. 4.3.1). Es un ciclo biogeoquímico con una intervención mínima de reacciones químicas donde el agua se traslada de unos lugares a otros o cambia de estado físico. La cantidad total de agua en el planeta no cambia. La mayor parte de la masa del agua se encuentra en estado líquido, sobre todo en los océanos y mares y en menor medida en forma de agua subterránea o agua superficial (en ríos, arroyos y almacenamientos). El segundo compartimento por su importancia es el del agua acumulada como hielo sobre todo en los casquetes glaciares antártico y groenlandés, con una participación pequeña de los glaciares de montaña, sobre todo de las latitudes altas y medias, y de la banquisa. Por último, una fracción menor está presente en la atmósfera como vapor o, en estado gaseoso, como nubes. Esta fracción atmosférica es sin embargo muy importante para el intercambio entre compartimentos y para la circulación horizontal del agua, de manera que se asegura un suministro permanente a las regiones de la superficie continental alejadas de los depósitos principales.

Las fases del ciclo del agua se estructuran en:

1. **Evaporación.** El agua se evapora en la superficie oceánica, sobre la superficie terrestre y también por los organismos, en el fenómeno de la transpiración en plantas.
2. **Condensación.** El agua en forma de vapor asciende y se condensa formando las nubes, constituidas por agua en pequeñas gotas. Además, el vapor agua puede condensarse sobre superficies cuando las condiciones atmosféricas son adecuadas.
3. **Precipitación.** Las gotas de agua que forman las nubes se enfrían y se condensan. Las gotas de agua al unirse forman gotas de mayor tamaño que terminan por precipitarse a la superficie terrestre.
4. **Infiltración.** El agua que alcanza el suelo, penetra a través de sus poros y pasa a formar parte de las capas subterráneas.
5. **Escorrentía.** El agua se desplaza a nivel superficial y a nivel subterráneo como consecuencia de diferencias de nivel en el terreno.
7. **Fusión.** El agua pasa de estado sólido a estado líquido cuando aumenta su temperatura. Se produce un deshielo.

4. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

8. Solidificación. Al disminuir la temperatura en el interior de una nube por debajo de 0 °C, el vapor de agua o el agua misma se congelan, precipitándose en forma de nieve o granizo.



Figura 4.3.1. Ciclo del agua. <http://ga.water.usgs.gov/edu/wcpagesize/spanish.html>. Source: USGS, original upload 22 January 2006 by L. Fdez.

4.3.2. La formación de rocío

El rocío se define como un fenómeno físico-meteorológico en el que la humedad del aire se condensa en forma de gotas de agua por la disminución brusca de la temperatura, o el contacto con superficies frías. La formación de rocío se ha intentado comprender desde tiempos muy remotos. Ya Aristoteles (384 – 322 a.C.) en su trabajo “Meteorológica” intentaba comprender la formación de rocío por una aproximación científica, escribiendo: “Cualquier humedad evaporada durante el día que no sube lejos todavía fracasa cuando se enfría durante la noche y se llama el rocío. El rocío se forma cuando el vapor se condensa en forma de agua. El rocío se forma bajo un tiempo claro y la condensación no es posible cuando hay viento”.

En un sistema a una temperatura determinada, existe una única presión de vapor tal que las fases líquida y gaseosa del agua se encuentran en equilibrio (presión de vapor de saturación). La presión de vapor de saturación aumenta a medida que aumenta la temperatura a la cual se encuentra el sistema, siguiendo la relación de Clausius

Clapeyron (Ec. 4.3.1; Fig. 4.3.2) que caracteriza la transición de fase entre dos estados de la materia mediante la relación:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H}{T\Delta V} \quad (4.3.1)$$

donde dP / dT es la pendiente de la curva de coexistencia que separa ambos estados de la materia y ΔH es el calor latente o entalpía del cambio de fase y ΔV es el volumen.

En la atmósfera, el aire está conformado por aire seco y vapor de agua. Puesto que el aire se encuentra en equilibrio térmico, la temperatura del aire coincide con la temperatura del vapor y del agua líquida que éste contenga. La temperatura a la cual el sistema se encuentra saturado se denomina temperatura de rocío. Si el sistema alcanza dicha temperatura, y la misma se encuentra por encima de los 0 °C, entonces se observará la formación del rocío sobre las diferentes superficies (Fig. 4.3.3).

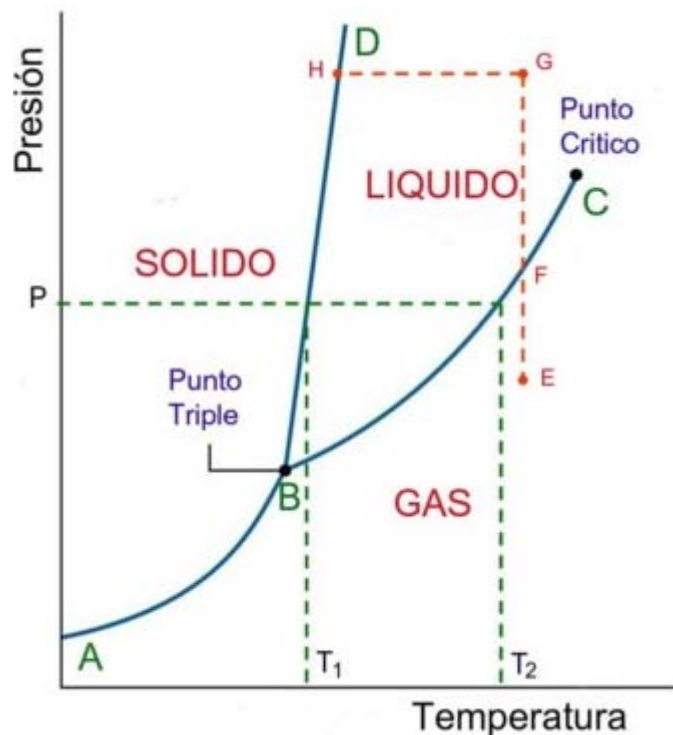


Figura 4.3.2. Diagrama de fases de Clausius Clapeyron. <http://joule.qfa.uam.es>

El diagrama psicrométrico de Mollier (Fig. 4.3.4), que representa la fracción de masa de agua a las diferentes temperaturas y humedades relativas, permite definir la temperatura a la cual el aire se satura de agua. Esta temperatura, denominada de rocío, es la temperatura a la cual el vapor de agua se condensa.

4. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

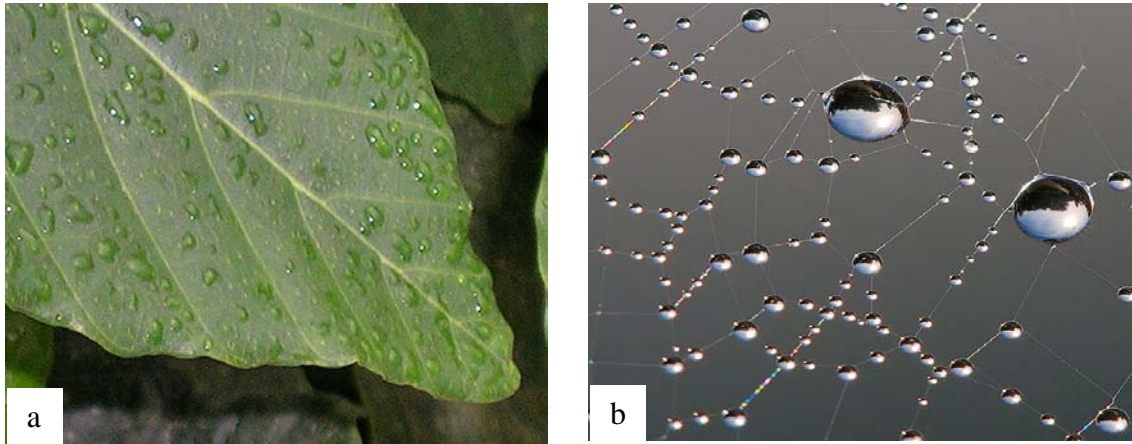


Figura 4.3.3. Formación de rocío sobre una hoja (a) y sobre una telaraña (b).

http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Dew_on_leaf.JPG and http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Dew_on_spider_web_Luc_Viatour.jpg

Como ejemplo, si la temperatura del aire durante la noche es 15°C y la humedad relativa es 80% (condiciones características de una noche con formación de rocío en la CS) la temperatura de rocío será de 13°C . Si la temperatura de una superficie dentro del sistema es menor de 13°C , el vapor de agua del aire se condensará formando agua en estado líquido sobre la superficie.

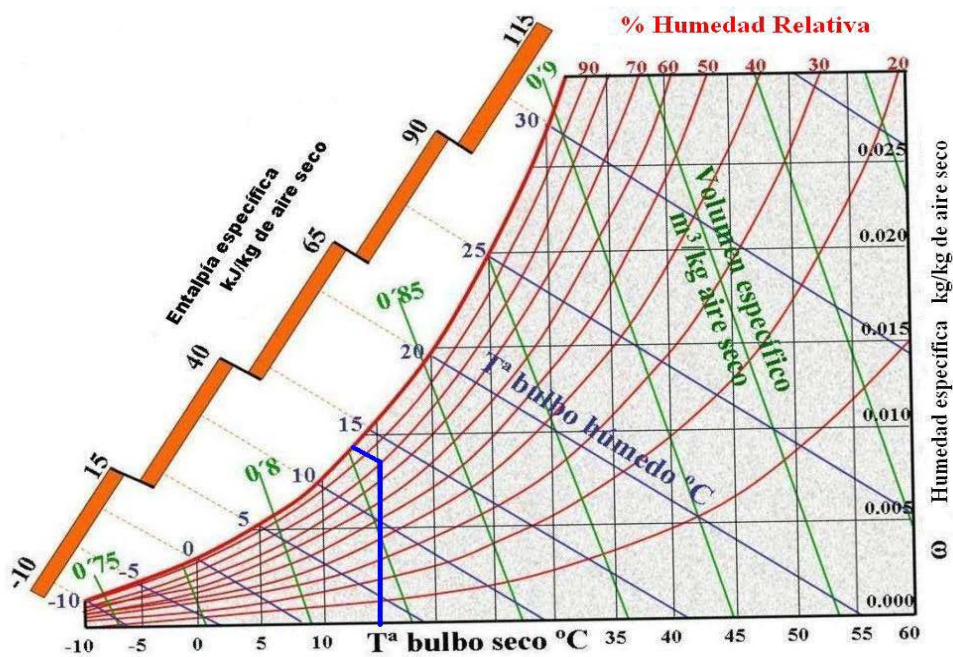


Figura 4.3.4. Diagrama psicrométrico. Ejemplo de cálculo de temperatura de rocío a partir de una temperatura (15°C) y de una humedad relativa del aire (80%).

4.3.2.1. El enfriamiento radiativo

El enfriamiento radiativo se basa en que todos los cuerpos, a temperatura superior a 0 K, emiten radiación electromagnética con espectros de diferentes longitudes de onda en función de su temperatura. Cuando un cuerpo es expuesto a otro cuerpo de menor temperatura, el cuerpo más caliente emite una energía de onda larga que afecta al cuerpo de menor temperatura. Si la cantidad de calor que pierde es mayor que la que gana, el balance térmico es negativo y el cuerpo se somete a un enfriamiento radiativo.

Como ejemplo general de enfriamiento radiativo, se puede citar el calentamiento y enfriamiento cíclico al que se ve sometida la Tierra, debido a los flujos de energía que intervienen en su balance global (Fig. 4.3.5). Durante el día, la Tierra se calienta al recibir un volumen de energía radiante proveniente del Sol (radiación de onda corta) muy superior al que ella, por radiación de onda larga, emite hacia el cielo, su balance radiativo es positivo. En cambio, durante la noche, su balance es negativo, al ser mayor la radiación infrarroja larga emitida que la recibida de la atmósfera, especialmente en condiciones de cielo claro. La cantidad de calor absorbido por la tierra cada año está equilibrada por la correspondiente pérdida de calor. Sin el enfriamiento, el equilibrio térmico terrestre no podría mantenerse, aumentaría la temperatura de la Tierra y de la atmósfera y dejaría de ser favorable para la mayor parte de las formas de vida (Koenigsberger, 1977).

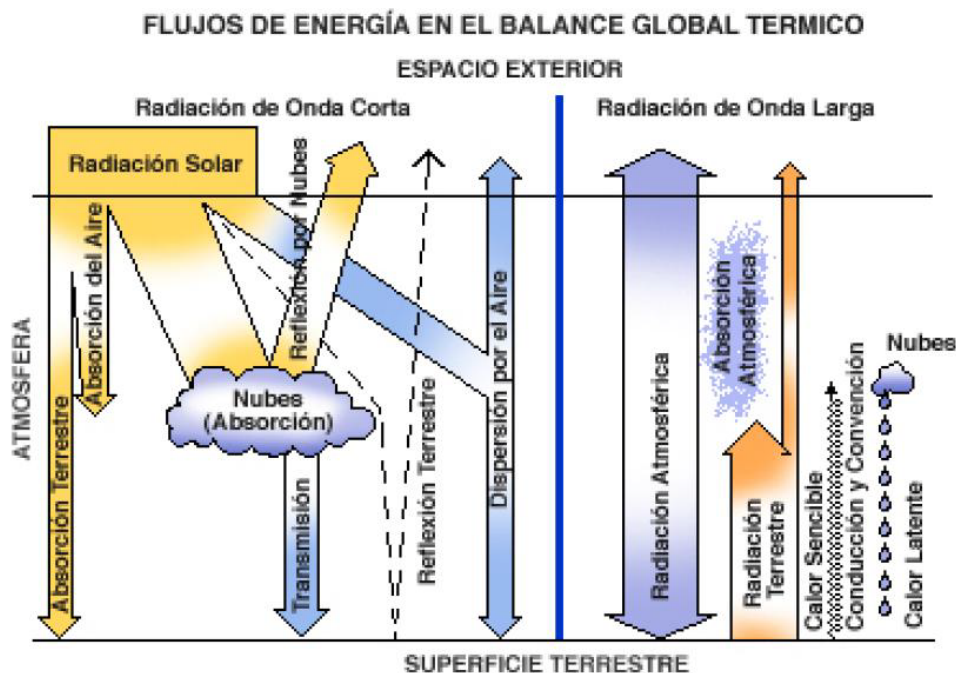


Figura 4.3.5. Flujos de energía en el balance térmico terrestre.

<http://www.puc.cl/sweduc/geomar/html/glosario>

4. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

Existen multitud de aplicaciones del enfriamiento radiativo. En el Medio Oriente y África del Norte, se conocen las construcciones vernáculas cuyo diseño permite que las superficies emitan durante la noche parte de la energía absorbida durante el día, aprovechando los cielos claros de estas regiones (Ambriz, 1976). En Irán se lograba producir hielo al exponer delgadas láminas de agua durante la noche (Bahdori, 1978). Además, en regiones áridas y semiáridas con elevada escasez de recursos hídricos, se han llevado a cabo durante los últimos años numerosos estudios con el objetivo de determinar la cantidad y la calidad del vapor de agua atmosférico condensable y recuperable sobre superficies altamente emisivas (Nilsson, 1994, 1996; Muselli et al., 2002, 2006a; 2006b; Beysens et al., 2003, 2005a, 2007; Sharan et al. 2007a; 2007b; 2007c, 2011).

Para comprender los fenómenos físicos envueltos en el enfriamiento radiativo es necesario entender ciertos conceptos fundamentales, definiciones y leyes que lo rigen. A continuación se revisan los aspectos más relevantes.

Radiación y espectro electromagnético

La radiación es una forma de transferencia de energía de ondas electromagnéticas en una gran gama de longitudes de onda y de frecuencias. El espectro de radiación electromagnética es muy variado (Fig. 4.3.6), sin embargo, para los estudios de los procesos de condensación sobre superficies, es la “radiación térmica” así denominada a la radiación emitida por los cuerpos en virtud de su temperatura, quien condiciona su formación. La mayor parte de esta radiación se encuentra en la región del espectro electromagnético que abarca desde 0 a 100 μm (Santamuris, 1996). Este rango del espectro incluye la luz visible que va de desde 0,4 a 0,7 μm .

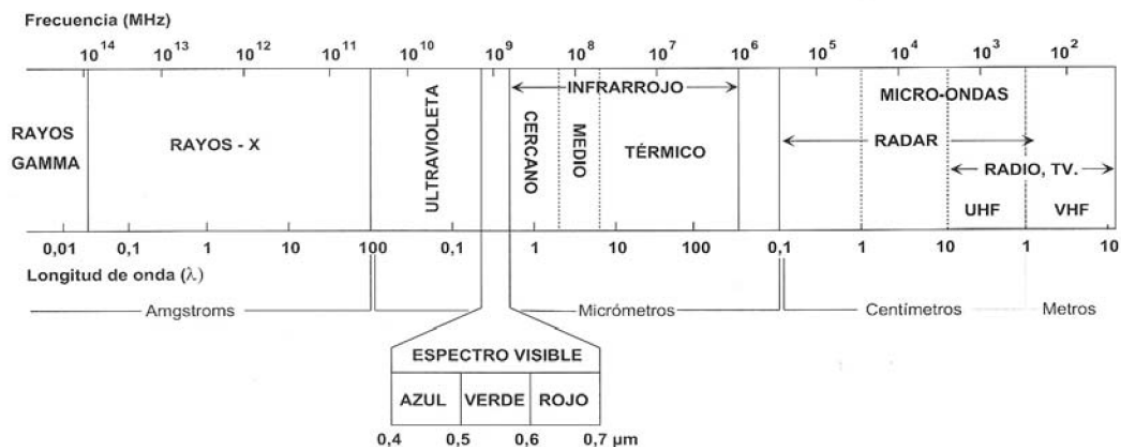


Figura 4.3.6. Regiones del espectro electromagnético (Chuvieco, 2008)

La formación de rocío está estrechamente relacionada con el enfriamiento nocturno de una superficie (y de la capa de aire adyacente) debido a la pérdida neta de energía por emisión de radiación infrarroja. Esta pérdida de energía es mayor en noches despejadas y frías cuando la radiación solar de onda larga no es absorbida por las nubes, haciendo posible alcanzar el punto de saturación, formándose rocío.

Ley de Planck

La distribución espectral de la radiación (emitancia espectral) para un cuerpo negro a la temperatura (T) y para una determinada longitud de onda (λ) es dada por la Ley de Planck (Ec. 4.3.2; Fig. 4.3.7), (Duffie y Beckman, 1974):

$$W = \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1} \varepsilon \quad (4.3.2)$$

donde W , representa la energía perdida por radiación hacia el cielo ($\text{W m}^{-2} \mu\text{m}$), ε , la emisividad del material emisor y $C_1 = 3,740 \times 10^8$ y $C_2 = 1,44 \times 10^4$ son constantes.

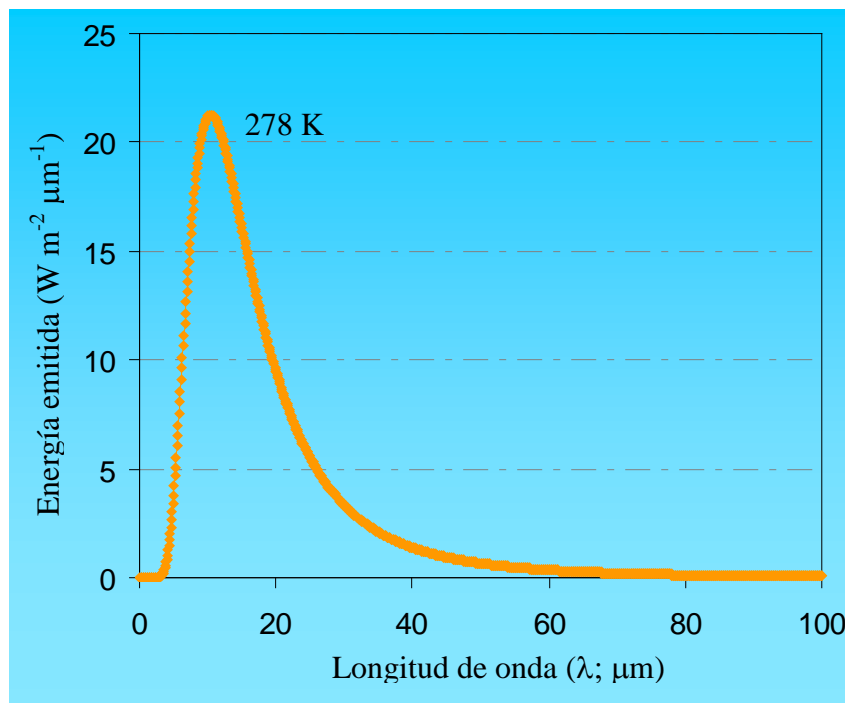


Figura 4.3.7. Distribución de la energía emitida (W m^{-2}) en el rango del espectro electromagnético 0 – 100 μm de acuerdo a la ley de Planck asumiendo un cuerpo negro (emisividad $\varepsilon = 1$) y una temperatura de superficie ($T = 278 \text{ K}$). Elaboración propia.

4. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

Ley de Stefan-Boltzmann

La integración de la energía emitida sobre todas las longitudes de onda (M_n) se determina mediante la Ley de Stefan-Boltzman (Ec. 4.3.3) que expresa la energía total emitida por un cuerpo negro por unidad de superficie emisora.

$$M_n = \varepsilon \sigma T^4 \quad (4.3.3)$$

Todo cuerpo por encima del cero absoluto emite energía radiante, de modo proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. Para determinar la temperatura de un cuerpo real a partir de la energía emitida deberá considerarse su emisividad.

Absorción, reflexión y transmisión de la radiación

Cuando la radiación incide sobre la superficie de un cuerpo, un porcentaje se refleja, otro se absorbe y el resto se transmite. Para caracterizar la respuesta de las superficies a la radiación, se utilizan los parámetros: reflectividad, absorptividad y transmisividad.

- Reflectividad (ρ): relación entre radiación reflejada y la radiación incidente.
- Absortividad (α): relación entre radiación absorbida y la radiación incidente.
- Transmisividad (τ): relación entre radiación transmitida y la radiación incidente.

Aplicando el principio de conservación de la energía:

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (4.3.4)$$

En caso de cuerpos opacos, no hay transmisión de la energía y el principio de la conservación de la energía se calcula como:

$$\rho + \alpha = 1 \quad (4.3.5)$$

De acuerdo con la Ley de Kirchhoff, que describe la relación entre las propiedades de emisión y absorción de la radiación de un cuerpo, la emisividad es igual a la absorptividad para una misma longitud de onda y dirección de propagación. El concepto de emisividad, ε , permite describir la capacidad de emisión de energía de una superficie u objeto real en relación a un emisor perfecto o cuerpo negro. Los cuerpos

negros son cuerpos ideales cuya emisión de energía solo depende de la temperatura de su superficie, presentando una absorptividad igual a 1.

Al igual que los anteriores parámetros, ε depende de la longitud de onda. Valores de emisividad para superficies homogéneas en la franja infrarroja del espectro electromagnético, puede encontrarse fácilmente en la bibliografía. La NASA ofrece una amplia biblioteca gratuita de valores de emisividad en todo el espectro, para un amplio rango de materiales y de tipos de superficies. La Tabla 4.3.1 presenta la emisividad de varias superficies genéricas para diferentes intervalos espectrales.

Tabla 4.3.1. Variación de la emisividad en la ventana térmica en función del tipo de superficie y longitud de onda (Sobrino, 2000).

	Longitud de onda (μm)			
Superficie	8 – 14	10 – 12	10,5 – 11,5	11,5 – 12,5
Arena	0,914	0,970	0,960	0,975
Limo	0,944	0,972	0,969	0,976
Arcilla	0,957	0,974	0,972	0,977
Hierba	0,984	0,985	0,985	0,986
Agua	0,995	0,995	0,990	0,994

4.3.2.2. Condensación de vapor de agua sobre una superficie

La formación de rocío sobre una superficie es el resultado de la transición de fase a estado líquido a la cual el vapor de agua se somete cuando entra en contacto sobre ella. La condición fundamental para la formación de rocío es que la temperatura de la superficie sobre la cual condensación se efectúa sea inferior o igual al del punto de rocío. La temperatura de rocío coincide entonces con la temperatura a la cual la presión parcial de vapor de agua es igual a la presión de vapor saturante para las condiciones dadas de presión y la condensación crea un déficit de humedad absoluta. Desde un punto de vista físico, la diferencia entre la temperatura de rocío y la temperatura de la superficie es proporcional a la energía necesaria para la transferencia del vapor de agua a través de la capa límite.

La condensación sobre una superficie se puede formar siguiendo dos tipos estructurales caracterizados por el aspecto físico de su formación. En el primer caso, la condensación moja la totalidad de la superficie y forma una película continua constituyendo entonces la nueva superficie de condensación, de tamaño igual a la

superficie inicial (Guyer y Brownell, 1999). En el segundo caso, la condensación se produce sobre una triple superficie de contacto; sólido, gas y sobre la superficie de las gotas ya condensadas. En este último caso, las gotas de agua que se forman sobre la superficie se organizan individualmente. Inicialmente de tamaño microscópico (millonésima parte un milímetro), y aumentando de tamaño al fusionarse con las moléculas de vapor que se encuentran alrededor de ellas. Este fenómeno se conoce como coalescencia (Beysens, 1995; 2006). Finalmente, cuando una gota de agua alcanza un tamaño tal que las fuerza de gravedad ejercida por la gota supera a la capilaridad (fuerzas de cohesión), la gota alcanza su punto de rotura y se desliza sobre la superficie condensadora y permite ser recogida. La tasa de nucleación de las gotas depende de las propiedades de mojado de la superficie y del ángulo de contacto (ϕ) entre la gota y la superficie. ϕ es 0° cuando la condensación forma una película sobre la superficie y máximo (180°) cuando el líquido que no moja la superficie (Zhao y Beysens, 1995; Beysens, 1995; 2006). La Figura 4.3.8. muestra los diferentes tipos de condensación de vapor de agua sobre una pared en función del ángulo de contacto y del tiempo de condensación y la Figura 4.3.9. presenta un esquema con los diferentes ángulos de contacto entre la gota y la superficie condensadora.

4.3.3. Variables influyentes en la formación de rocío

La formación de rocío sobre superficies es un fenómeno atmosférico que se encuentra estrechamente relacionado con el medio exterior que rodea la superficie, y por tanto de los parámetros climáticos y de los intercambios energéticos que se dan lugar en la superficie condensadora y que intervienen en el intercambio de fase. Además, la formación de rocío es un fenómeno energético. Beysens et al. (2006) indicó que teniendo en cuenta el calor latente de vaporización del agua ($2,5 \text{ KJ g}^{-1}$ a 20°C) el rendimiento teórico que puede ser esperado sobre una superficie ronda los $0,8 \text{ mm día}^{-1}$ para un enfriamiento radiativo del orden de $60 - 100 \text{ W m}^{-2}$.

A continuación se exponen las variables climatológicas y las componentes energéticas de la radiación solar que intervienen en el proceso de formación de condensación sobre una superficie.

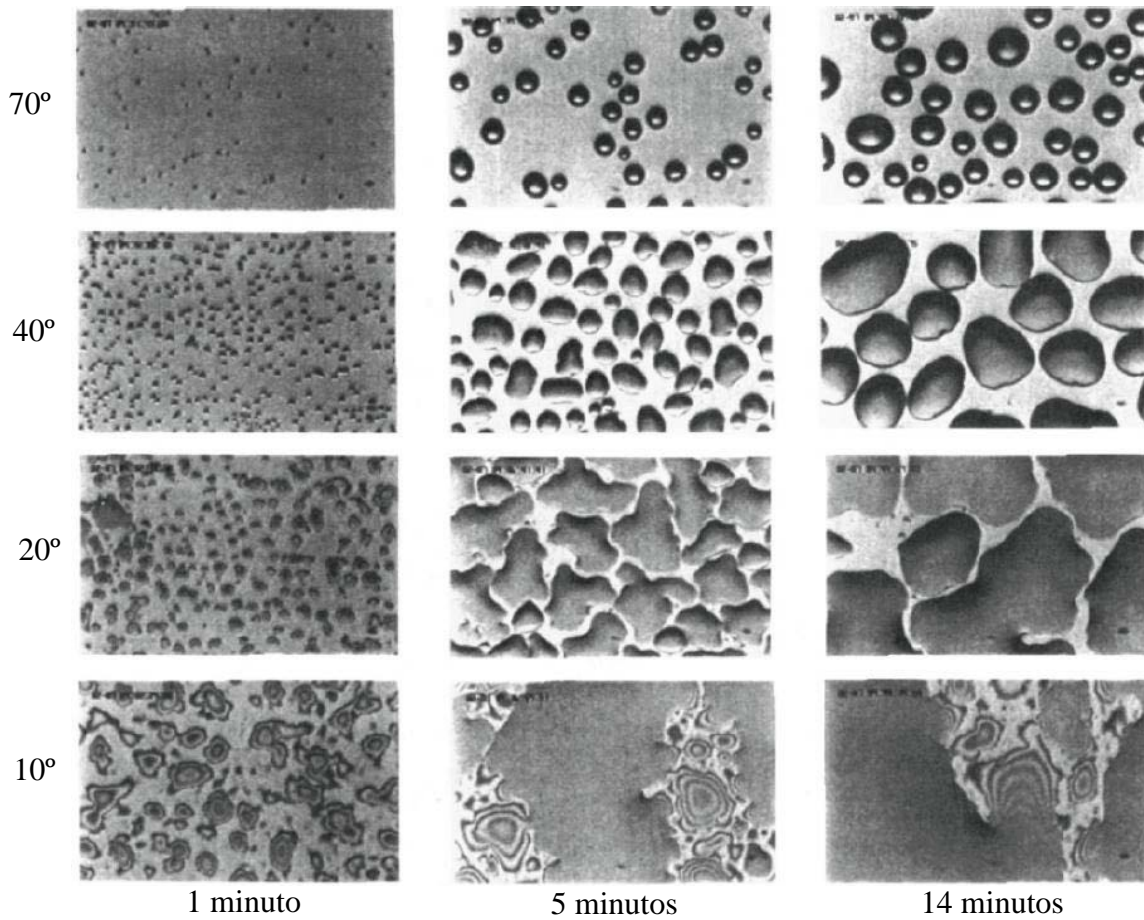


Figura. 4.3.8. Ejemplo de patrones de crecimiento de condensación de gotas de agua en una pared con un gradiente en el ángulo de contacto. Cada columna representa los patrones observados en cuatro localizaciones diferentes de la superficie al tiempo indicado. Los ángulos indicados representan los ángulos de contacto medios en cada posición. El ancho de la foto es de 385 μm . (Adaptado de Zhao y Beysens, 1995).

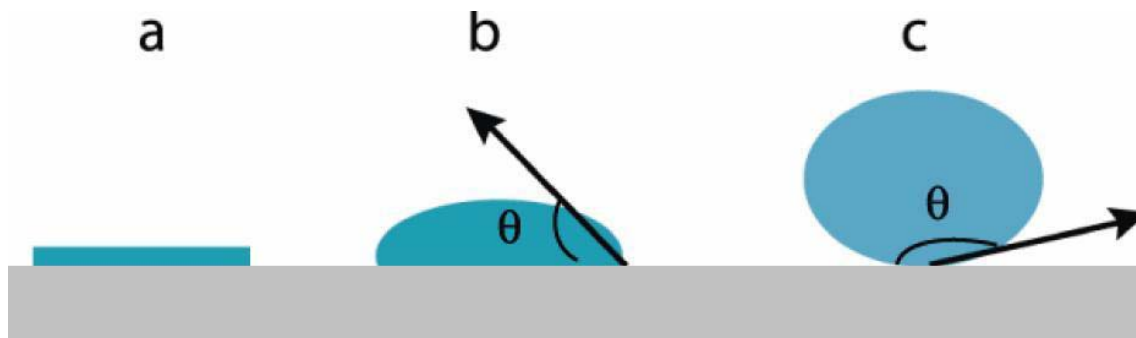


Figura. 4.3.9. Ángulos de contacto entra la gota de agua condensada y la superficie cuando la temperatura de la superficie es menor que el punto de rocío. (a) el líquido moja perfectamente la superficie, $\phi = 0$, (b) el líquido moja parcialmente el sólido, $\phi < \pi/2$ y (c) el líquido no moja el sólido, $\phi > \pi/2$.

4.3.3.1. Variables meteorológicas

Las variables meteorológicas que intervienen en el fenómeno de condensación de vapor de agua atmosférico son básicamente la humedad relativa, la temperatura del aire, la temperatura de rocío y la velocidad del viento. Además de estas 4 variables, la temperatura de la superficie condensadora juega un papel importante en el proceso de condensación.

Humedad del aire

La humedad del aire es la cantidad de vapor de agua que se encuentra presente en la atmósfera terrestre. El vapor procede de la evaporación de los mares y océanos, de los ríos, los lagos, las plantas y otros seres vivos. La cantidad de vapor de agua que puede absorber el aire depende de su temperatura. El aire caliente es capaz de admitir más vapor de agua que el aire frío. El aire caliente, menos denso que el aire frío, se eleva en la atmósfera y al llegar a zonas más frías se condensa y forma las nubes (gotas de agua o cristales de hielo). Cuando estas gotas de agua o cristales de hielo aumentan de peso, precipitan en forma de lluvia o nieve. La humedad del aire puede expresarse de varias formas: la humedad absoluta y la humedad relativa.

La humedad absoluta se define como la masa total de agua existente en el aire por unidad de volumen, y se expresa mediante la siguiente relación:

$$\text{Humedad absoluta} = \frac{\text{Masa de agua (g)}}{\text{Volumen de aire (m}^3\text{)}} \quad (4.3.6)$$

La humedad relativa de una masa de aire representa la relación entre la cantidad de vapor de agua que contiene y la que tendría si estuviera completamente saturada; así cuanto más se aproxima el valor de la humedad relativa al 100% más húmedo está. Se define mediante la siguiente relación:

$$\text{Humedad Relativa (\%)} = 100 \frac{\text{Presión parcial de vapor (Kpa)}}{\text{Presión parcial vapor saturación (Kpa)}} \quad (4.3.7)$$

Para cada temperatura, el aire húmedo se corresponde con una presión de vapor a saturación. Cuando el aire no es capaz de soportar más agua se satura y la parte de

agua en exceso se transforma en forma líquida (condensación) o hielo (solidificación) dependiendo de la temperatura.

Algunos investigadores han analizado la importancia de la humedad relativa en el proceso de formación del rocío. Muselli et al. (2006b, 2009) estudiaron la formación de condensación sobre superficies condensadoras y manifestaron que los registros de condensación están linealmente correlacionados con los datos de humedad relativa observados y que además existe un umbral a partir del cual no es posible la formación de condensación; valores de humedad relativa inferiores al 75%.

Temperatura del aire

La temperatura del aire es una variable meteorológica fácilmente medible mediante el uso de termómetros o termógrafos. Esta variable tiene gran importancia en el proceso de condensación atmosférica ya que, si las condiciones ambientales son adecuadas, el proceso se inicia cuando la temperatura del aire es menor que la temperatura de rocío.

Además, la temperatura del aire sufre variaciones que dependen de diversos factores:

- Variación diurna: se define como el cambio de temperatura entre el día y la noche, producido por la rotación de la Tierra. Durante el día la superficie de la Tierra se calienta, mientras que durante la noche, en ausencia de la radiación solar, la superficie se enfría. Dicho enfriamiento continúa hasta la salida del sol. Por lo tanto, la temperatura mínima ocurre generalmente poco antes de la salida del sol.
- Variación estacional: esta variación se debe a la inclinación del eje terrestre y el movimiento de traslación de la Tierra alrededor del sol. El ángulo de incidencia de los rayos solares varía, estacionalmente, en forma diferente para los dos hemisferios. El hemisferio norte es más cálido en los meses de junio, julio y agosto, mientras que el hemisferio sur recibe más energía solar en diciembre, enero y febrero.
- Variación con la latitud: la mayor inclinación de los rayos solares en altas latitudes, hace que éstos aporten menor energía solar sobre estas regiones, siendo esta energía mínima en los polos y máxima en el ecuador.
- Variaciones con el tipo de superficie: la distribución de continentes y océanos produce un efecto muy importante en la variación de la temperatura, debido a sus diferentes capacidades de absorción y emisión de la radiación. Las grandes

masas de agua tienden a minimizar los cambios de temperatura, mientras que los continentes permiten variaciones considerables en la misma. Sobre los continentes existen diferentes tipos de suelo: los terrenos pantanosos, húmedos y las áreas con vegetación espesa tienden a atenuar los cambios de temperatura, en tanto que las regiones desérticas o áridas permiten cambios grandes en la misma.

- Variaciones con la altura: a través del primer estrato de la atmósfera, llamada troposfera, la temperatura decrece con la altura. Este decrecimiento se define como gradiente vertical de temperatura y es del orden de $6,5^{\circ}\text{C}$ cada 1000 m. Sin embargo, a menudo ocurre un aumento de la temperatura con la altura: inversión de temperatura. Durante la noche la Tierra irradia (pierde calor) y se enfría mucho más rápido que el aire que la circunda; entonces, el aire en contacto con ella será más frío mientras que por encima la temperatura será mayor.

En el estudio del proceso de formación de condensación, la temperatura del aire es sumamente importante pues tiene efectos directos sobre la temperatura de rocío y sobre la temperatura superficial de los cuerpos.

Temperatura de rocío

La temperatura del punto de rocío o punto de condensación es la temperatura a la cual el aire necesita ser enfriado para saturarse. La presión real de vapor del aire es la presión de saturación de vapor en la temperatura del punto de rocío. Cuanto más seco este el aire, más grande será la diferencia entre la temperatura del aire y la temperatura del punto de rocío. La Figura 4.3.10 muestra la presión de vapor a saturación como función de la temperatura.

Viento

El viento se define como el movimiento de la masa de aire en la atmósfera como consecuencia de las diferencias de presión de atmosférica entre dos puntos. Se encuentra condicionado por varios factores como la fuerza de Coriolis, la distribución espacial de la presión atmosférica, la topografía del medio estudiado y las fases alternantes de calentamiento diario y enfriamiento nocturno.

Adicionalmente, el sol es el agente fundamental de la formación del viento. El sol calienta los mares y los océanos y estos a su vez calientan las capas de aire que los dominan. El aire al calentarse aumenta en volumen y se mueve.

Para definir correctamente el viento es necesario definir su velocidad o fuerza y su dirección.

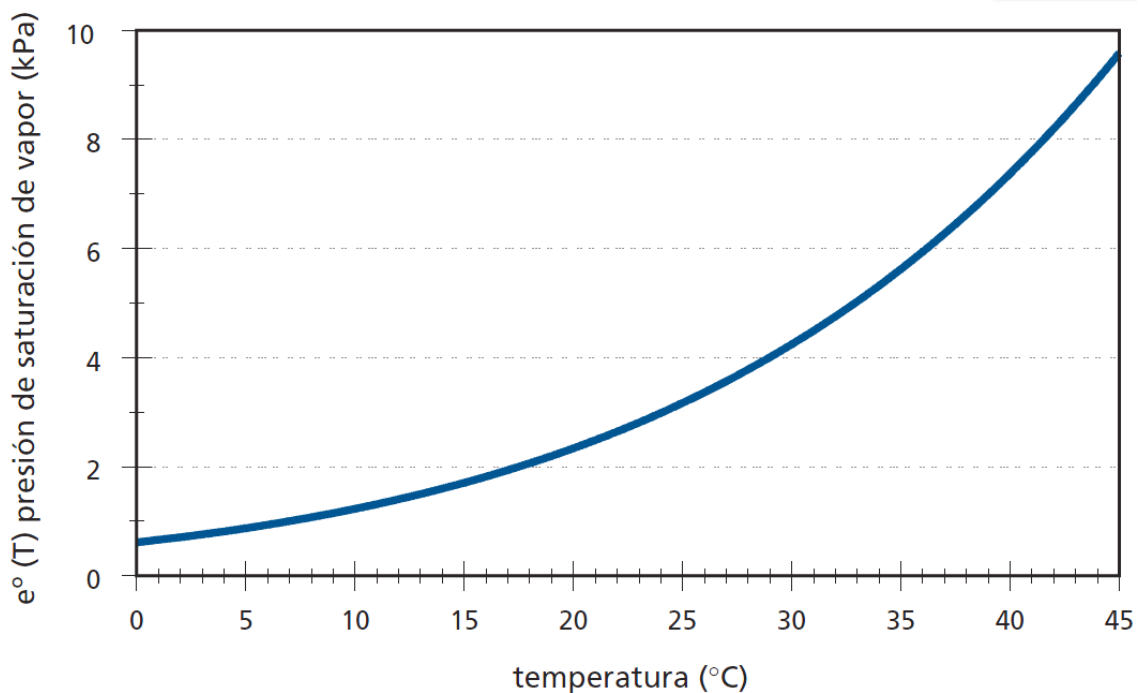


Figura 4.3.10. Presión de vapor a saturación como función de la temperatura. Fuente: Allen et al. (1998).

Temperatura superficial de condensadores

Durante la noche, las superficies expuestas a cielo abierto se pueden enfriar entre 1 y 10 °C debajo de la temperatura ambiente mediante la emisión de energía; entre 60 – 100 W m⁻² para un cielo claro (Clus, 2007).

La temperatura de una superficie es la resultante del equilibrio entre la energía solar que absorbe la superficie y la energía que irradia hacia el espacio. Durante la noche, periodo donde se produce la condensación sobre una superficie, sólo son dos las componentes radiativas que condicionan el balance energético: radiación solar atmosférica y radiación solar de onda larga emitida por la superficie.

4.3.3.2. Componentes de la radiación solar

Durante la noche, las componentes energéticas de la radiación solar que afectan el enfriamiento radiativo de la superficie de un condensador son la radiación solar atmosférica (L_a) y la radiación de onda larga emitida por la superficie del condensador (L_f). La resultante de estas dos componentes se conoce como la radiación neta (R_n ; Ec. 4.3.8). Durante el día, R_n es positivo y por tanto la superficie del condensador aumenta

de temperatura. Sin embargo, durante la noche, la radiación emitida por el cuerpo es mayor que la radiación recibida desde la atmósfera, observando un R_n negativo y por tanto un enfriamiento del cuerpo.

$$R_n = L_a - L_f \quad (4.3.8)$$

Cuando el enfriamiento del cuerpo es tal que su temperatura desciende por debajo del punto de rocío, si las condiciones ambientales (humedad relativa, viento etc...) son adecuadas, comenzará el proceso de condensación.

4.3.4. Medición de la condensación de rocío

La recolección de la humedad atmosférica es una tecnología antigua que ha sido redescubierta en tiempos modernos. En 1900 el ingeniero ruso Friedrich Zibold, mientras se dedicaba a la tala de bosques en Crimea (Ucrania), descubrió en las colinas, cerca del sitio de la localización de la antigua Bizancio, ciudad de Teodosia, 13 grandes cúmulos cónicos de piedras, cada uno de aproximadamente 10.000 m^2 y altura entre 9 – 12 m. Zibold llegó a la conclusión que las pilas de piedras eran condensadores que suministraban agua a Teodosia aportando entre 2.000 y 4.000 litros bajo condiciones óptimas.

Para verificar su hipótesis, construyó en Tepe-Oba cerca de Teodosia, un condensador formado con piedras de río (10 – 40 cm de diámetro) apiladas a una altitud de 288 m (Figure 4.3.11). Las dimensiones del condensador eran 6 m de altura y 8 m de diámetro superior (Nikolayev y al., 1996; Beysens y Mylymuk, 2005b). Este condensador comenzó su funcionamiento en 1912 con una producción máxima diaria de 360 L. En 1915, se detectaron fugas por la parte inferior del condensador y el experimento se abandonó.

En 1929, el bioclimatologista Chaptal, construyó una estructura piramidal de hormigón de 3 m^2 y 2,5 m de altura, con anillos con pequeños orificios de ventilación en la parte superior e inferior (Fig. 4.3.12). Su volumen (8 m^3) se llenó de trozos de piedra caliza (5 – 10 cm) para condensar el vapor de agua y recogerla en un depósito. El rendimiento de este equipo varió entre 1 y $2,5 \text{ L día}^{-1}$.



Figura 4.3.11. Reconstrucción digital del condensador diseñado por Zibold en Feodosia (1912). (Photo: D. Vincon).

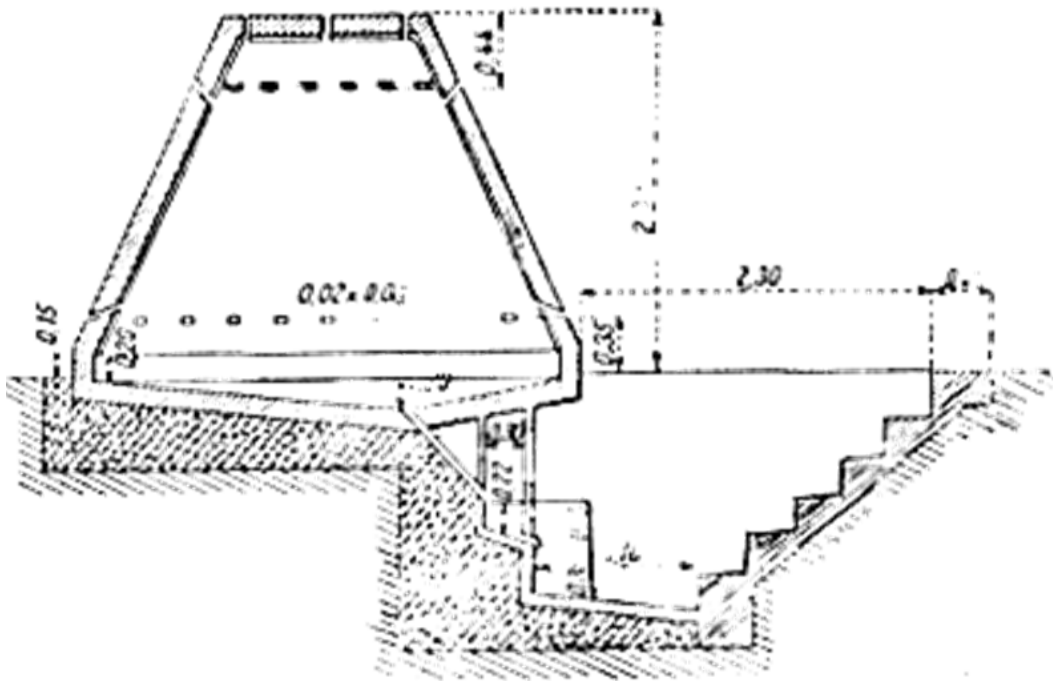


Figura 4.3.12. Condensador diseñado por Chaptal (1929). (Photo: OPUR).

4. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

En 1930 el inventor Belga Achille Knapen construyó un condensador de 13,5 m de altura en Trans-en-Provence en Francia (Figura 4.3.13). Este aún sigue en pie aunque está ruinoso. Se estimó que suministraría un volumen de 7.500 L de agua por cada 900 m² de superficie de condensación, sin embargo, no funcionó bien y sólo produjo 12 L por noche.

Los diseños inicialmente fabricados para la formación de rocío eran bastos y formados por materiales macizos. Sin embargo, la investigación moderna en temas de condensación natural mediante el enfriamiento radiativo pasivo indica que los mejores materiales para la recolección de la humedad atmosférica deben ser ligeros y con alto poder emisivo para enfriarse rápidamente.

El enfriamiento radiativo natural de una superficie oscila entre 25 – 150 W m⁻² durante la noche (Beysens et al., 2006). Por tanto después de compensar por el calor latente de condensación, el máximo rendimiento ideal no podría ser más de un litro por metro cuadrado.



Figura 4.3.13. Condensador diseñado por Achille Knapen (1930). (Photo: International Organization for Dew Utilization; OPUR).

En este sentido, la *International Organization for Dew Utilization* (OPUR; organización sin ánimo de lucro) ha estandarizado la caracterización de la recolección de rocío estableciendo la metodología, la instrumentación y presentado datos de ensayos experimentales realizados en diversas regiones alrededor del mundo. Por un lado promueve la utilización de los condensadores radiativos pasivos que consisten en una superficie de 1 m² aislada del suelo mediante una lámina de 3 cm de poliestireno expandido e inclinada 30° para asegurar un buen compromiso entre la pérdida de emergía por radiación y la recolección de agua por gravedad (Beysens et al., 2003) (Figura 4.3.14). El agua que se condensa en su superficie durante la noche se recoge a traves de una canaleta y se conduce hasta un depósito donde su volumen puede ser cuantificado. Por otro lado, OPUR recomienda el uso del film estándar diseñado por Nilsson et al. (1994) y fabricado en polietileno blanco de baja densidad y especialmente dotado con microesferas de TiO₂ (5%; diametro 0,19 µm) y BaSO₄ (2%; diámetro 0,8 µm) incrustadas en el polietileno. Este material aporta propiedades hidrofílicas que reducen la barrera a la nucleación y favorecen el comienzo del proceso de condensación. Además confiere una alta emisividad en la ventana atmosférica del espectro electromagnético (7 – 14 µm).



Figura 4.3.14. Condensador diseñado por Nilsson et al., (1994). (Photo: International Organization for Dew Utilization; OPUR).

Actualmente, existen una gran variedad de trabajos cuyo objetivo es la recuperación de agua desde la atmósfera mediante el enfriamiento radiativo de superficies. Muselli et al. (2002) ensayó un condensador radiativo pasivo de 30 m² de superficie cerca de Ajaccio (Córcega; Francia) y observó 214 noches de condensación durante un periodo de 478 días, con un valor medio de 0,12 mm por noche de condensación y alcanzando un máximo de 0,38 mm. Estudios posteriores de estos investigadores en el año 2006 mostraron cantidades similares de condensación (media de 0,13 mm día⁻¹). Jacob et al. (2008) experimentó con dos tipologías estructurales diferentes de condensadores radiativos pasivos; estructura plana inclinada 30° y estructura con forma tronco-cónica. Finalmente, Muselli et al. (2009) y Sharan et al. (2011) indicaron que es necesario aumentar la escala de trabajo mediante la aplicación y adaptación de los films de polietileno en los impluviums existentes en regiones áridas y semiáridas. Concretamente, Sharan et al. (2011) ensayaron en 2007 en Gujarat (India) un condensador radiativo pasivo de gran escala (850 m² de superficie) y registraron una producción de condensación de 6.545 L, equivalente a 7,5 mm día⁻¹.

Los films de polietileno usados en estos diseños a gran escala, deben de tener bajo coste, ser resistentes a las fuerzas de fricción y tener fácil disponibilidad en la región donde se utilicen. Una elección bastante acertada, sería el uso de films de polietileno negro de baja densidad, que son ampliamente usados en agricultura para acolchados, pues responden fielmente a los criterios anteriormente expuestos. Sin embargo su potencial como recolectores de condensación no ha sido anteriormente estudiado y por tanto es necesario su análisis antes que puedan ser usados para estos propósitos.

4.3.5. Métodos de estimación de la condensación de rocío

Existe una amplia variedad de metodologías para estimar la condensación sobre superficies, las cuales se pueden clasificar en los siguientes grupos: modelos basados en la dinámica de flujo computacional, modelos basados en las redes neuronales y modelos físicos.

Los modelos de flujo computacional (Computational Fluid Dynamics; CFD) tratan de unir diferentes ecuaciones de la termodinámica para describir un fenómeno físico como el movimiento del aire alrededor de un condensador. Estos modelos permiten una modelización de los sistemas por elementos finitos al discretizar el espacio

de estudio en volúmenes elementales y propiedades físicas conocidas. La resolución iterativa de las ecuaciones de Navier - Stokes entre celdas vecinas permite determinar los intercambios de materia y de calor en todo el espacio de estudio. Para el caso concreto de la simulación de un proceso de condensación sobre una superficie, se suelen utilizar para simular la temperatura del condensador a partir de la cual determinar los volúmenes de agua condensada. Los métodos basados en las redes neuronales artificiales (RNA) consisten en una simulación compleja de las propiedades observadas en los sistemas neuronales biológicos a través de modelos matemáticos recreados mediante mecanismos artificiales. Finalmente, los modelos físicos, estudian las variaciones térmicas y termodinámicas del condensador con el objetivo de determinar el volumen de agua condensado. En este último caso, la tasa de condensación, depende de los parámetros meteorológicos de cada región (humedad relativa, viento, temperatura del aire, radiación neta, temperatura de rocío,...).

Entre estos métodos, la aplicación del balance de energía en la superficie de un condensador, enmarcado en el grupo modelos físicos, es una técnica sencilla y adecuada para simular procesos de condensación sobre superficies (Pedro y Gillespie, 1982; Nilsson, 1996; Jacobs et al., 2008). A continuación se describe brevemente su desarrollo.

El balance de energía en la superficie de un condensador (Ec. 4.3.9), aislado de la tierra, se puede expresar como el equilibrio de las ganancias energéticas y las pérdidas durante el periodo de una noche:

$$R_n + \lambda C + H = 0 \quad (4.3.9)$$

Donde R_n es la radiación neta, C es el flujo de calor latente de condensación, λ el calor latente de vaporización y H el intercambio de calor sensible entre el aire y la superficie del suelo.

Durante la noche, la radiación neta de la superficie del condensador se puede expresar de la siguiente manera:

$$R_n = L_a - L_f \quad (4.3.10)$$

4. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

Donde L_a es la radiación atmosférica y L_f la radiación de onda larga emitida por el condensador. L_a se puede medir directamente y L_f puede ser calculado a partir de la temperatura de la superficie del condensador, T_f (K) por medio de la ley de Stefan-Boltzmann,

$$L_f = \sigma \varepsilon T_f^4 \quad (4.3.11)$$

con σ (constante de Stefan-Boltzmann = $5,68 \cdot 10^8 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$) y ε (emisividad de la superficie del condensador).

El calor sensible se deriva a partir de la temperatura de superficie del condensador mediante la ecuación:

$$H = h_c (T_f - T_a) \quad (4.3.12)$$

La tasa nocturna de condensación de rocío, λC (W m^{-2}), se obtiene a partir de la ecuación de transferencia de masa:

$$\lambda C = h_v (e_s - e_a) \quad (4.3.13)$$

donde e_s (kPa) es la presión de vapor de agua a saturación, e_a (kPa) la presión de vapor actual del aire, y h_v ($\text{W m}^{-2} \text{ kPa}^{-1}$) es el coeficiente de intercambio de transferencia de vapor de agua ($\text{W m}^{-2} \text{ kPa}^{-1}$) en la interfaz aire-superficie del condensador.

Asumiendo la analogía entre la transferencia de calor y masa, el valor de h_v se puede considerar igual a h_c/γ , donde h_c es el coeficiente de intercambio por transferencia de calor por convección ($\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$) y γ es la constante psicrométrica (kPa K^{-1}).

La cuantificación de la condensación de agua en balsas de riego sombreadas mediante una CSS es una tarea difícil de llevar a cabo. Actualmente, los sensores de medida de variación de nivel de agua alcanzan precisiones de $\pm 0,4 \text{ mm}$, lo cual indica que volúmenes de agua condensada en una balsa de riego inferiores a 400 gramos no son detectados por los sensores. Por tanto para una correcta determinación de la condensación de rocío en balsas de riego, se deben buscar métodos alternativos. En este sentido, el balance de energía expuesto puede aplicarse tanto a una superficie de agua como a una CSS sobre una balsa de riego y permitir mediante un método simple de

comparación de ambas temperaturas de superficie (agua, CSS o CRP), relacionar la cantidad de condensación obtenida en un film de polietileno altamente emisor como el propuesto por la OPUR y la condensación formada en las respectivas superficies.

5. Publicaciones que constituyen la tesis

5.1. Publicación 1

5.1.1. Resumen de la publicación

Título

Effects of a suspended shade cloth cover on water quality of an agricultural reservoir for irrigation.

Introducción y objetivos

En los últimos 30 años, la disponibilidad de agua de riego en cantidad y calidad suficiente se ha convertido en un factor limitante de la actividad agrícola en las regiones áridas y semiáridas, como la Cuenca del Segura (CS; sureste español), donde se ha incrementado la competitividad por los recursos hídricos (CHS, 1997). Además los sistemas de riego tradicional se han modernizado transformándose en sistemas de riego de alta frecuencia con el fin de aumentar la eficiencia y la productividad del uso del agua en la agricultura.

Los sistemas de distribución del agua, organizados mediante turnos, no se ajustan adecuadamente a las exigencias de los sistemas de riego localizado, que requieren un suministro continuo de agua. Como consecuencia, muchos agricultores y comunidades de regantes se han visto obligados a la construcción de pequeñas balsas de riego con el fin de regular el suministro de agua para el riego de sus cultivos (Martínez-Alvarez et al., 2008).

El uso de balsas presenta varios inconvenientes: (i) la superficie ocupada por las balsas asciende a 5.000 ha y supone un 1,81% de la superficie regada en la cuenca, (ii) experimentan elevadas pérdidas de agua por evaporación que ascienden a 58 hm³ y equivalen al 8,3% del agua consumida por la agricultura en la CS (Martínez-Alvarez et al., 2008) y (iii) la elevada presencia de nutrientes en el agua almacenada favorece la proliferación de algas que pueden provocar serios problemas de calidad del agua y afectar a los sistemas de aplicación mediante riego localizado (Karico, 2000; Sperling et al., 2008).

Entre las tecnologías propuestas para reducir las pérdidas de agua por evaporación (Brown, 1988), la instalación de las coberturas de sombreado suspendidas (CSSs) que pueden alcanzar factores de reducción de la evaporación entre 75 y 90% (Craig et al., 2005; Gallego-Elvira et al., 2010), son desde el punto de vista técnico, la

opción más adecuada para reducir las pérdidas de agua en balsas de riego. Esta técnica consiste en la instalación de una estructura reticular ligera sobre la balsa, fabricada mediante un doble entramado de cables de acero o plástico, los cuales se apoyan en el murete perimetral de la balsa o en postes de acero galvanizado anclados a zapatas o “muertos” de hormigón. Cuando la dimensión lateral de la balsa supera los 100 metros, se puede recurrir a la instalación de columnas de apoyo intermedio. Este doble entramado de cables sustenta a la cobertura de polietileno, cuya porosidad al aire y a la lluvia es un requisito fundamental para evitar sobreesfuerzos estructurales.

Como beneficio adicional a la reducción de la evaporación, la instalación de una CSS, mejora la calidad del agua al reducir: (i) el crecimiento normal de algas al disminuir los niveles de radiación en la balsa, (ii) la entrada de suciedad y otras partículas arrastradas por el viento, y (iii) la salinidad del agua almacenada.

Los organismos acuáticos, pueden crecer y desarrollarse en el agua almacenada en balsas de riego y deteriorar su calidad. Este deterioro adquiere especial importancia cuando el uso del agua se destina a riego por goteo. Su desarrollo incrementa la concentración de sólidos en suspensión en el agua almacenada causando graves problemas en los sistemas de riego por goteo como obturaciones en los emisores que afectan en gran medida a la uniformidad de aplicación del agua (Adin et al., 1989; Adin y Sacks, 1991; Bucks y Nakayama, 1991).

Para este estudio, se determinó durante dos años la variación de (i) la temperatura del agua (T_w), (ii) la conductividad eléctrica (CE), (iii) la clorofila – a ($Cl-a$), la turbidez (W_t) y (iv) el oxígeno disuelto (OD). Al inicio del segundo año, se instaló una CSS para estudiar los efectos sobre la reducción de la evaporación y sobre la calidad del agua.

Materiales y métodos

Características de la balsa y de la cobertura

La balsa de riego experimental se ubica en las proximidades de la Estación Experimental de Investigación Agroalimentaria “Tomas Ferro”, de la Universidad Politécnica de Cartagena (La Palma, Murcia). El área se caracteriza por un clima Mediterráneo semiárido con veranos secos y calurosos e inviernos templados. La temperatura media anual es de 17,5 °C y la precipitación de 350 mm con una elevada variación interanual.

La balsa de riego, cuyas dimensiones son características de la región de estudio, cuenta con una superficie de 2.400 m^2 ($55 \text{ m} \times 44 \text{ m}$), una profundidad de 5 m y una capacidad volumétrica de 9.790 m^3 . La balsa está impermeabilizada mediante una geomembrana para prevenir las pérdidas de agua por infiltración.

El experimento se llevó a cabo durante dos años consecutivos desde abril de 2007 hasta abril de 2009. Al inicio del ensayo, la balsa se llenó con agua procedente del acueducto Tajo – Segura, agua salada de pozo y agua desalada. Estas tres aguas de diferente calidad se mezclaron previamente para obtener una conductividad eléctrica de 2 mS cm^{-1} . Durante el periodo de experimentación la balsa no se usó para regulación de riego, aunque se produjeron dos rellenos. El primero (500 mm , equivalente al 10,4% del volumen de almacenamiento máximo) ocurrió en septiembre de 2007 para compensar la evaporación estival. El segundo (184 mm , equivalente al 3,8% del volumen de almacenamiento máximo) se produjo antes de la instalación de la CSS en marzo de 2008.

Entre abril de 2007 y abril de 2008 la balsa permaneció descubierta, mientras que durante el segundo año de experimentación, se instaló en la balsa una CSS. La cobertura fue de características similares a las citadas en la introducción.

Registro de datos

Para analizar la calidad del agua, se evaluaron, para el perfil de profundidad de la balsa, los principales parámetros de calidad de agua (T_w , CE , $Cl-a$, W_t y OD) mediante una sonda multiparamétrica (YSI – 6600EDS - V2, USA). Los sondeos se realizaron mensualmente a las 11:00 am (hora local). Valores discretos a las profundidades de 0,2, 0,5, 1,5, 2,5, 3,5 y 4,5 se seleccionaron del perfil continuo registrado. Se registraron tres perfiles y se realizó la media de ellos al no encontrar diferencias significativas.

La tasa de evaporación (E), precipitación (P), viento (U) y radiación solar (R_s) se monitorizaron continuamente en la balsa descubierta. E se determinó a partir de los registros de nivel agua obtenidos con un transductor de presión (PDCR1830, Druck, UK) con una precisión de $\pm 0.06\%$ en un rango de $7,5 \text{ KPa}$. Los registros de P (tipping bucket rain gauge, type 52203, RM Young Inc., Traverse City, USA), U (A100R, Vector Instruments, UK) y R_s (CMP 11, Kipp & Zonnen B.V., The Netherlands) se obtuvieron en una estación meteorológica cercana a la balsa de riego y localizada a 2 m sobre el suelo. Durante el segundo año de experimentación, se añadieron sensores para determinar la radiación solar, R_{sc} , y la velocidad del viento, U_c , bajo la cobertura, (CMP

5.1. PUBLICACIÓN 1

11-Kipp & Zonnen pyranometer y UPCT BLC-Y wind speed prototype sensor respectivamente). Todos los sensores se conectaron a un datalogger (CR1000, Campbell Scientific Inc., USA) y se calibraron periódicamente. La sonda multiparamétrica YSI-Series se calibró cada 6 meses.

Análisis estadístico

Los datos de calidad de agua se interpretaron usando un análisis de varianza (statgraphics Plus v.5.1) para detectar diferencias significativas entre los tres perfiles de medida de calidad de agua, y para analizar las variaciones en profundidad de T_w , CE , $Cl-a$, W_t y OD .

El test de Tukey, con un nivel de confianza del 95% se calculó por comparación entre los tres perfiles y para la variación de los parámetros de calidad del agua con la profundidad.

Resultados y discusión

Efectos sobre la temperatura del agua

Durante el primer año de experimentación (balsa descubierta) apenas se observó estratificación térmica ($1 - 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ en verano). El efecto constante del viento sobre la balsa y el oleaje mezclaron el agua y por tanto la balsa se puede considerar isoterma. Las temperaturas máximas se registraron entre julio de 2007 y septiembre de 2007 cuando R_s fue mayor (media diaria de $254,2\text{ W m}^{-2}$), alcanzándose un máximo absoluto de $28,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que las temperaturas mínimas (mínimo absoluto de $11,8\text{ }^{\circ}\text{C}$) se alcanzaron durante diciembre de 2007 a febrero de 2008 cuando se observaron los valores más bajos de R_s (media diaria de $101,7\text{ W m}^{-2}$).

La instalación de la CSS durante el segundo año de experimentación modificó el comportamiento térmico del agua almacenada. En este caso, la temperatura máxima se alcanzó en julio de 2008 ($26,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $0,2\text{ m}$ de profundidad) mientras que la temperatura mínima se alcanzó en febrero de 2009 ($10,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ en todo el perfil). Inmediatamente después de la instalación de la cobertura, la masa de agua se estratificó, creándose un gradiente de temperatura en el que las capas superiores fueron las capas más calientes. La máxima diferencia de temperatura entre la capa más profunda ($4,5$) y la más superficial ($0,2\text{ m}$) se alcanzó en julio de 2009 ($12\text{ }^{\circ}\text{C}$). La estratificación térmica desapareció en otoño de 2008 cuando las primeras lluvias enfriaron las capas de agua superficiales provocando la mezcla de todos los estratos térmicos.

Efectos sobre la conductividad eléctrica

Durante el primer periodo del primer año de experimentación (de abril de 2007 a agosto de 2007), el balance negativo entre E y P (-703,7 mm) provocó un progresivo incremento de la CE , que alcanzó un máximo de $2,79 \text{ mS cm}^{-1}$ en agosto de 2007 (incremento del 14,3% sobre el valor inicial en abril de 2007).

Desde abril de 2007 hasta el término del primer año de experimentación, las dos entradas de agua en forma de rellenos (500 mm en septiembre de 2007 y 184 mm en marzo de 2008) junto con el balance ligeramente favorable a la lluvia ($P = 117 \text{ mm}$ y $E = 97 \text{ mm}$) significaron una evolución de la CE constante observándose una ligera reducción ($2,79$ a $2,71 \text{ mS cm}^{-1}$).

La escasez de lluvia ($P = 19 \text{ mm}$) y la baja tasa de evaporación ($E = 83,3 \text{ mm}$) durante el primer periodo del segundo año de experimentación provocaron un ligero incremento de la CE de $2,69 \text{ mS cm}^{-1}$ a $2,77 \text{ mS cm}^{-1}$. Con la llegada de las lluvias en otoño de 2008, el balance de agua se tornó positivo a la precipitación ($P = 507,4 \text{ mm}$ y $E = 100,1 \text{ mm}$) produciendo una notable reducción de la CE que alcanzo un mínimo de $2,47 \text{ mS cm}^{-1}$ en abril de 2009.

La salinidad en el agua de riego puede reducir la productividad de un cultivo una vez que la concentración de sales supera el umbral específico de cada cultivo (Ayers y Westcot, 1985). Es este estudio, la instalación de la CSS permitió mantener un balance positivo entre la lluvia y la evaporación que reduce la salinidad del agua almacenada en la balsa. Esto permite producir beneficios agronómicos cuando se usa agua para riego de baja calidad (Parry et al., 2005).

Efectos sobre la clorofila-a, turbidez y oxígeno disuelto

La concentración de $Cl-a$ se monitorizo como indicador de los cambios en la actividad fotosintética de las algas unicelulares. La $Cl-a$ no varió significativamente en el perfil de profundidad durante el periodo de experimentación, por tanto los datos muestran el valor medio para todas las profundidades. Durante el primer año (balsa descubierta), la $Cl-a$ siguió la tendencia de la temperatura del agua alcanzándose un máximo de $27 \mu\text{g L}^{-1}$ en octubre de 2007. Con la instalación de la CSS, la R_s sufrió una fuerte reducción (99%) y el efecto del viento sobre la superficie se minimizó, limitando la actividad fotosintética y reduciendo progresivamente la concentración de algas ($Cl-a = 1 \mu\text{g L}^{-1}$ en junio 08). Entre septiembre de 2008 y diciembre de 2008 se observó un ligero crecimiento de algas que indicó que algunas algas toleraron el sombreado prolongado, y

compitieron con las bacterias heterotróficas por el carbono orgánico (Furusato et al., 2004). Probablemente las lluvias otoñales resuspendieron algunos nutrientes y células de algas del fondo de la balsa estimulando la actividad microbiológica en la columna de agua.

W_t proporciona una estima de los sólidos en suspensión, tanto partículas físicas como biológicas en el agua. La variación de W_t fue muy similar a la observada con la *Cl-a*. W_t presentó un incremento estacional al final del verano y se redujo sustancialmente después de la instalación de la CSS. La turbulencia del agua asociada con las lluvias otoñales durante el segundo año incrementó ligeramente la turbidez del agua. Aún así, W_t se mantuvo bastante inferior a los niveles alcanzados en la balsa descubierta durante el primer año de experimentación.

Durante el primer año de experimentación, el *OD* permaneció consistentemente alto durante el periodo estival como consecuencia del oxígeno liberado por las algas fotosintéticamente activas y la acción de las olas. Durante los meses invernales, la concentración de *OD* también se mantuvo elevada. En este caso, los niveles altos de *OD* se debieron a la oxigenación por efecto de las olas y por la reducción de la temperatura del agua. Con la instalación de la CSS, la concentración de *OD* se redujo drásticamente como consecuencia de la reducción de la transmisión de la radiación solar a la balsa que limitó la fotosíntesis y por la reducción del efecto del viento que impidió el proceso de difusión de oxígeno desde la atmósfera al agua (Gladyshev, 2002).

El *OD* es un parámetro de calidad del agua muy importante y puede llegar a ser un factor limitante en algunos sistemas de agricultura intensiva (Raviv et al., 2004; Bhattarai et al., 2005). Por ejemplo, Marfa et al. (2005) indicó que concentraciones de *OD* inferiores a 3 mg L^{-1} en la solución de un sistema hidropónico podrían afectar el crecimiento de los cultivos. En este estudio, se registraron concentraciones de *OD* inferiores a 3 mg L^{-1} en las 4 semanas posteriores a la instalación de la cobertura. Sin embargo, el agua con niveles reducidos de *OD*, considerada hipóxica, se re-oxigena al circular por las diferentes etapas (bomba, emisores, suelo) de un sistema de riego por goteo (Maestre-Valero y Martínez-Alvarez, 2010).

Conclusiones

En ausencia de cobertura, el agua almacenada en una balsa de riego se mantiene isoterma, mientras que con la instalación de la CSS el agua se estratifica térmicamente. La alta reducción de la evaporación (balance positivo entre lluvia y evaporación)

durante el segundo año, justifica la continua reducción de la CE , beneficiosa desde el punto de vista agronómico cuando se usan aguas de baja calidad. La instalación de la CSS, limita el efecto de la R_s y del viento (no oleaje) sobre la superficie del agua, reduciendo fuertemente la actividad fotosintética y la concentración de algas en la balsa. Los incrementos observados en $Cl-a$ y W_t después de las lluvias de otoño de 2008, sugieren que la reducción del efecto del viento incrementó la tasa de sedimentación de partículas suspendidas, y la reducción de la radiación, limitó el metabolismo microbiano a heterótrofos.

Los niveles de OD también sufren una notable reducción como consecuencia de la reducción del oleaje y de la actividad fotosintética en la balsa, alcanzando concentraciones hipóxicas que pueden tener efectos nocivos sobre las plantas durante el riego.

En resumen, los cambios en la calidad del agua asociados a la instalación de una CSS ofrecen muchas ventajas para el riego por goteo. Se pierde menos agua por evaporación, los requerimientos de filtrado son menores y se reduce el riesgo de obturación de emisores. Por tanto se mejora la eficiencia en el uso del agua y de la energía, especialmente cuando se trata de agua de baja calidad.

5.1.2. Copia de la publicación

Agricultural Water Management 100 (2011) 70–75



Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Agricultural Water Management

journal homepage: www.elsevier.com/locate/agwat

Effects of a suspended shade cloth cover on water quality of an agricultural reservoir for irrigation

J.F. Maestre-Valero^{a,*}, V. Martínez-Alvarez^a, B. Gallego-Elvira^a, P. Pittaway^b^a Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Universidad Politécnica de Cartagena Paseo Alfonso XIII, 48, 30203 Cartagena, Spain^b National Centre for Engineering in Agriculture, University of Southern Queensland, Toowoomba, Queensland, Australia

ARTICLE INFO

Article history:

Received 19 January 2011

Accepted 25 August 2011

Available online 19 September 2011

Keywords:

Small dams

Drip irrigation

Electrical conductivity

Chlorophyll-a

Dissolved oxygen concentration

ABSTRACT

Water availability and quality are two fundamental factors for agriculture in arid and semi-arid regions. This study evaluates the effects of a water-permeable, Suspended Shade Cloth Cover (SSCC), on the quality of water stored in an on-farm Agricultural Water Reservoir (AWR). Water quality (water temperature, electrical conductivity, chlorophyll-a concentration, dissolved oxygen concentration and water turbidity) and environmental (evaporation, rainfall, wind speed and solar radiation) parameters were measured over a 2-year period in a typical AWR located in south-eastern Spain. In the first year, the AWR remained uncovered and the behaviour was quasi-isothermal. In the second year, installing a SSCC induced a thermal gradient in the water that reached a maximum temperature difference of 12 °C during summer. The lack of turbulence under the cover and the reduction in photosynthesis (95% reduction of chlorophyll-a) reduced the concentration of dissolved oxygen to 1.5 mg L⁻¹, and turbidity from 40 NTU at installation to less than 1 NTU. The positive balance between rainfall and evaporation during the second year reduced the electrical conductivity of the water by 8.2%. The improvement in water quality associated with the installation of a SSCC increases the efficiency of drip irrigation systems by reducing the water filtering requirements, the likelihood of emitter clogging, and the risk of irrigation-induced salinity.

© 2011 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Over the last 30 years, there have been significant water shortages for irrigation in the Segura River Basin (SRB; semi-arid region of south-eastern Spain), due to a decrease in the availability of surface water and an increasing demand for water, especially in agriculture (CHS, 1997). As a result, traditional furrow irrigation has been almost entirely replaced by drip irrigation systems in an effort to improve both water use efficiency and productivity in agriculture. Currently, drip irrigation takes up 203,775 ha in the SRB, or approximately 75.7% of the irrigated land (CHS, 2007). Many farmers and water agencies in the SRB use on-farm Agricultural Water Reservoirs (AWRs) for irrigation to manage irregular water allocation and extended periods without water supply (Martínez-Alvarez et al., 2008). These on-farm reservoirs are small to medium in size, with a surface area ranging from 0.1 to 3 ha and a depth of 5–10 m. Similar proliferation of agricultural water storages is happening in arid and semi-arid regions around the world (Hudson, 1987; Daigo

and Phaovattana, 1999; Craig et al., 2005; Downing et al., 2006; Ali et al., 2008).

There are at least two drawbacks to the on-farm AWR approach. Firstly, AWRs can experience significant evaporation losses in arid and semi-arid climates. There are more than 14,000 AWRs in the SRB (Martínez-Alvarez et al., 2008), with annual evaporative loss estimates of 58.5×10^6 m³, equivalent to 8.3% of the water consumed by agriculture. Secondly, the high nutrient loading in AWRs induce frequent algal blooms, resulting in serious water quality problems (Karico, 2000; Brainwood et al., 2004; Sperling et al., 2008).

New technologies have been developed to reduce evaporative loss. From a technical point of view, the installation of Suspended Shade Cloth Covers (SSCCs) is one of the most promising options (Craig et al., 2005; Martínez-Alvarez et al., 2006). This method consists of covering the AWR surface with a shade cover that is supported by a double reticulated frame structure made of steel or polyamide cables (Martínez-Alvarez et al., 2009). The cables are anchored either into the storage wall or to galvanised steel posts bolted to concrete footings. A black double polyethylene fabric is then attached between the frames and suspended over the AWR. The fabric is porous to water, but reduces light transmission by 99%. The installation of SSCCs has resulted in a reduction in annual evaporation of between 75 and 90% (Craig et al., 2005; Finn and

* Corresponding author. Tel.: +34 968 32 70 52; fax: +34 968 32 54 33.
E-mail address: josef.maestre@upct.es (J.F. Maestre-Valero).

Barnes, 2007; Gallego-Elvira et al., 2011). Moreover, covering AWRs with SSCCs may improve water quality by (1) reducing algal photosynthesis and primary production, (2) excluding wind-borne dust and debris and (3) reducing the salinity of the stored water. These potential benefits have not yet been examined in the context of agricultural water use.

Results from field trials indicate that the reduction in algal photosynthesis that occurs after the installation of a cover has the potential to significantly reduce the cost of potable water treatment (Finn and Barnes, 2007). In south-eastern Australia, within 1 month of covering both clear (stored after potable water treatment) and raw water storages with a SSCC, algae were reduced by 98.2 and 86.5% respectively. The change in the water balance between evaporation and rainfall achieved by installing a porous black polyethylene SSCC may also improve water quality by reducing the concentration of soluble salts over time (Martínez-Alvarez et al., 2009).

Aquatic organisms, present in the water, may proliferate during storage in AWRs, increasing the concentration of suspended particulate matter in the water. This deterioration in water quality is of particular concern for drip irrigation systems. Drip irrigation systems are comprised of a large number of emitters per unit area, placed on or below the soil surface. The narrow passages and small openings of drip emitters are prone to clogging by physical, chemical and biological particles present in the water (Ravina et al., 1992). These irrigation systems are particularly sensitive to an increase in suspended particulate matter in the water, with clogged emitters affecting the uniformity of water application (Adin et al., 1989; Adin and Sacks, 1991; Bucks and Nakayama, 1991). Highly turbid irrigation water requires more pre-filtering. Besides, lack of water uniformity may adversely affect the growth and development of the crop, and the efficiency of the water and energy in the productivity of the crop may be reduced.

In this study, changes in temperature (T_w), electrical conductivity (EC), chlorophyll-*a* concentration (*Chl-a*), dissolved oxygen concentration (DO) and turbidity (W_t) of water in an AWR were studied over a 2-year period. After the first year, a water-permeable black polyethylene SSCC was installed to reduce evaporative loss. The potential of the SSCC to improve water quality and therefore the uniformity of drip irrigation was investigated.

2. Materials and methods

2.1. AWR and SSCC characteristics

The experimental AWR is located at the Agricultural Experimental Station of the Technical University of Cartagena, south-eastern Spain (37°41'N, 0°57'W; Fig. 1). This area is characterized by a Mediterranean semi-arid climate with warm and dry summers and mild winter conditions. Average annual temperature is 17.5°C, reaching maximum temperatures of 38°C in summer and minimum temperatures of 0.5°C in winter. Annual rainfall averages 350 mm, with high seasonal and inter-annual variability. Most precipitation occurs during the fall and winter months, but inter-annual droughts are also common. Average reference evapotranspiration calculated by the Penman-Monteith method is about 1250 mm year⁻¹.

The experimental AWR is a typical on-farm, medium-term storage in the SRB. It has a surface area of 2400 m² (rectangular, 55 m × 44 m), a depth of 5 m and an inner slope of 1/1 in the earthwork embankments, with a storage capacity of 9790 m³ (Fig. 2). This type of AWR usually serves farms with an area of 4–5 ha. Seepage through its walls and bottom is prevented by means of a waterproof liner.

Water quality in the AWR was studied during two consecutive years. In the first year, from April 2007 to April 2008 the AWR remained uncovered (Fig. 2a), whereas in the second year, from April 2008 to April 2009, the SSCC was installed (Fig. 2b). At the start of the trial, the AWR was filled with water piped from a large open surface reservoir. The reservoir is supplied by three different sources: Tajo-Segura Aqueduct, a 300 km long channel that supplies a large part of the water used in the SRB for crop irrigation; salty groundwater; and desalinized groundwater. These different-source waters are mixed in the reservoir to limit the conductivity to 2 mS cm⁻¹. During the 2-year experimental period, the AWR was not used for irrigation purposes, and there were just two refills. The first one (500 mm depth, equivalent to 10.4% of the maximum stored volume) occurred in September 2007 in order to compensate for summer evaporation. The second refill (184 mm depth, equivalent to 3.8% of the maximum stored volume) was performed prior to the installation of the SSCC in March 2008. No refilling occurred over the duration of the SSCC trial (second year of experimental period).

In April 2008, the SSCC was installed on the AWR, approximately 1 m above the water surface. The shade cover consists of a porous cloth suspended above the water surface by means of a high tension polyamide cable structure. The cloth is a double layer mesh made of black polyethylene fabric (Atarsun, Atarfil S.L.). The cables are suspended both above and below the cloth to hold the mesh and to prevent wind suction. The structure spans from one bank to the other without any intermediate posts, as the maximum breadth of the AWR is moderate (55 m).

2.2. Data collection

During the experimental period, a detailed water quality and environmental data monitoring program was undertaken in the AWR. To evaluate water quality, monthly water samples were monitored using a multi-parametric instrument (YSI-6600EDS-V2, USA) placed in the middle of the reservoir at about 11.00 am local time, to measure in situ T_w , EC, *Chl-a*, DO and W_t . Three upward profiles were taken from a depth of 5 m to the surface. Each upward profile took approximately 60 s to complete. Readings at depths of 0.2, 0.5, 1.5, 2.5, 3.5 and 4.5 m were selected from the profile measurements. Averages of these data at each depth were calculated after an analysis of variance (statistical software package Statgraphics Plus, v. 5.1) confirmed the measurements for the three profiles were not significantly different.

The evaporation rate (E), rainfall (P), wind speed (U) and solar radiation (R_s) were continuously monitored above the water in the uncovered AWR. E was obtained from water level measurements performed with a pressure transducer (PDCR1830, Druck, UK) with an accuracy of ±0.06% over a 7.5 kPa range. The water level sensor was placed in a vertical polyethylene pipe connected to the AWR. An automated weather station placed at an elevation of 2 m above-ground and located 80 m from the AWR monitored P (tipping bucket rain gauge, type 52203, RM Young Inc., Traverse City, USA), U (A100R, Vector Instruments, UK) and R_s (CMP 11, Kipp & Zonen B.V., The Netherlands). A similar data collecting procedure was used during the second year after the AWR was covered. Additional sensors (a UPCT BLC-Y wind speed prototype sensor and a CMP 11-Kipp & Zonen pyranometer) were placed on a structure attached to a raft below the cover (0.3 m above the water surface) to measure wind speed (U_c) and transmitted solar radiation (R_{tc}). All sensors were scanned at 10 s intervals, with results averaged on an hourly basis and recorded by automatic dataloggers (CR1000, Campbell Scientific Inc., USA). Environmental sensors were calibrated prior to the experiment and at the end of the first year of experimentation. The water quality multiparametric instrument was calibrated every 6 months.

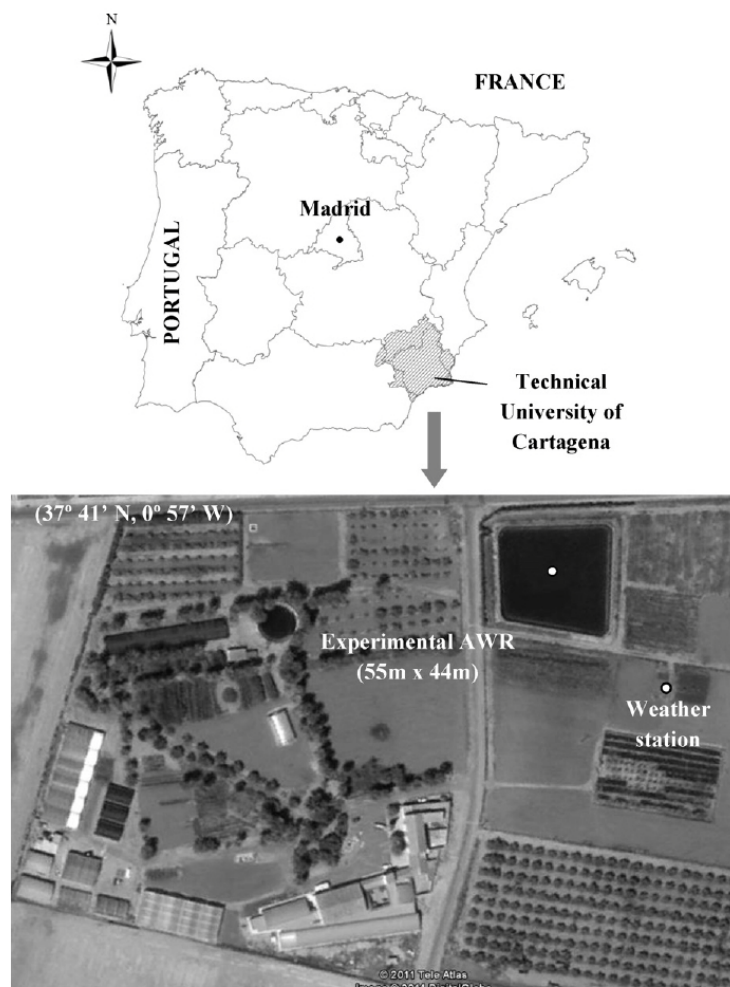


Fig. 1. Location of the experiment.

2.3. Data analysis

Water quality data were interpreted using an analysis of variance (statistical software package Statgraphics Plus v.5.1) to detect any significant difference between the three upward water quality profile measurements, and to analyze T_w , EC, Chl-*a*, DO and W_t variations with depth.

Tukey's range test, at a 95% confidence level was calculated for comparison between the three upward profiles and for the variation of the water quality parameters with depth. Analyses were performed using the monthly data collected over the 2-year duration of the trial.

3. Results and discussion

3.1. Effects of SSC on water temperature

During the first year of experimentation (uncovered AWR) the main heat flows affecting the T_w were the short-wave radiation and the incoming and outgoing long-wave radiation at the water

surface. The minimum and the maximum T_w were 11.8°C and 28.8°C respectively (Fig. 3a). Maximum values were registered from July 2007 to September 2007 when R_s was higher (daily mean of 254.2 W m⁻²) and minimum values were registered from December 2007 to February 2008 when R_s was lower (daily mean of 101.7 W m⁻²). A thermal gradient of the water in the uncovered AWR was not observed during the first year of experimentation, with a temperature difference of only 1–2°C between the surface layer and at the recorded depths in spring and summer. Wind turbulence regularly mixed the water and thus the AWR can be considered quasi-isothermal.

The installation of the SSC modified the energy balance of the AWR, with long-wave radiation emitted by the SSC (recorded maximum of 60°C at midday in summer) heating the air under the cover. However, the temperature of the water in the second year (covered AWR) remained below that recorded for the first year (uncovered AWR) for the same season (Fig. 3a). Additionally, the higher rainfall during the autumn and winter of the second year lowered the temperature of the water. The maximum T_w value was reached in July 2008 (26.7°C at 0.2 m depth) with the minimum T_w

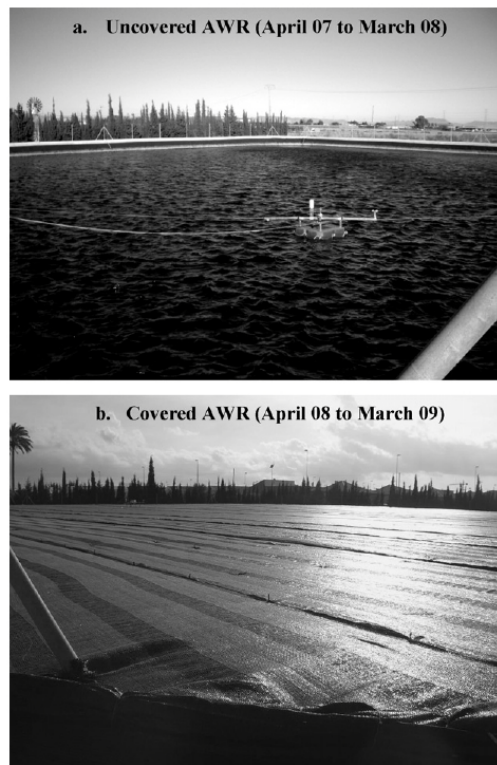


Fig. 2. Photographs of the reservoir: (a) uncovered and (b) covered.

observed in February 2009 (10.1°C in all the profiles). From May 2008 to November 2008 a thermal gradient of the water appeared due to lack of turbulence below the cover as a result of the wind shelter effect. The wind speed under the cover was reduced by 98.1%. The highest temperature gradient was recorded in July 2008, with a difference of 12°C between the deeper and surface layers (4.5 m and 0.2 m deep respectively). This thermal gradient disappeared in the fall, when the first autumn rain cooled the upper layer. Regular rainfall and the lower air temperature over the winter period induced thermal mixing in the water, inhibiting the thermal gradient (Fig. 3a).

3.2. Effects of SSCC on electrical conductivity of the water

During the first year, elevated rates of E (741.9 mm; Fig. 3b) and low P values (38.2 mm) over the summer led to a negative water balance between P and E in the AWR (-703.7 mm) that concentrated the soluble salts in the water. From the initial value of 2.39 mS cm^{-1} in April 2007, EC progressively increased to 2.79 mS cm^{-1} in August 2007, 14.3% above the initial value. E exceeded P from August until March 2008 ($P = 260.6$ mm and $E = 345.7$ mm), when water was added to the AWR to compensate for summer evaporation. The EC progressively decreased with the summer refill (500 mm), and the second refill (184 mm) prior to the installation of the SSCC from 2.79 to 2.71 mS cm^{-1} .

During the second year, the installation of the cover minimised the summer increase in EC by substantially reducing the rate of evaporative loss. From April 2008 to August 2008 P was only 19 mm and E_c was 83.3 mm. The negative balance between P and E_c

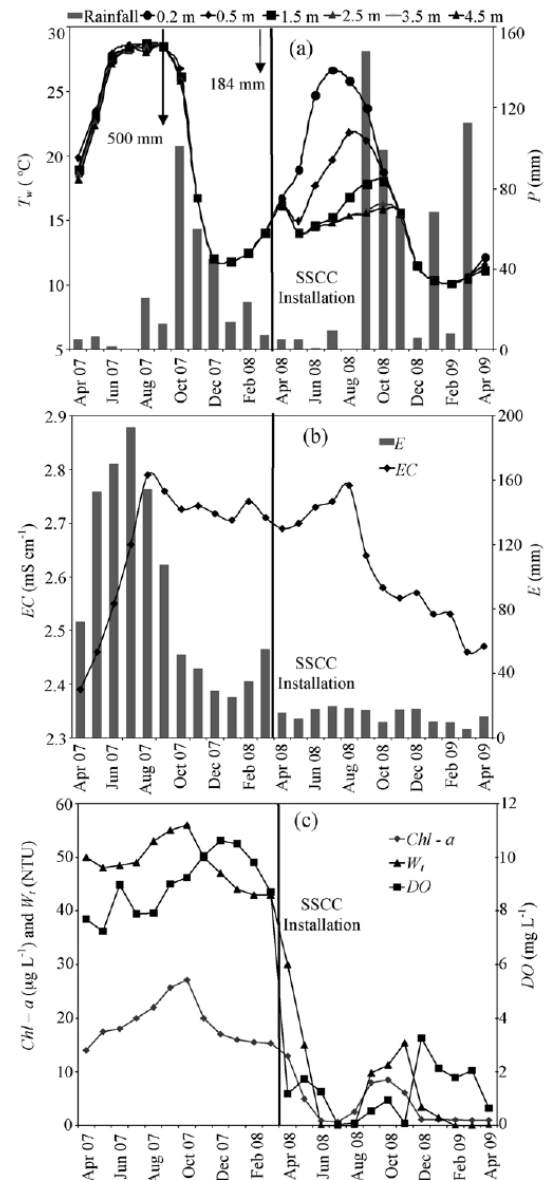


Fig. 3. (a) Water temperature (T_w) at different depths in the AWR and rainfall (P), (b) evaporation rate (E) and electrical conductivity (EC), (c) chlorophyll- a concentration ($Chl-a$), turbidity (W_t) and dissolved oxygen concentration (DO) for the 2-year experimental period. Data for EC , $Chl-a$, W_t and DO are presented as the average of readings taken at all depths, as there was no significant variation with depth. Arrows in (a) indicate when water from the open surface reservoir was added to compensate for evaporative losses in September 2007 and March 2008. Vertical line indicates when the cover (SSCC) was installed.

(-64.3 mm) led to a slight increase in EC from 2.69 to 2.77 mS cm^{-1} . With the onset of autumn and winter rain, P increased to 507.4 mm whereas E_c was only 100.1 mm. The positive balance between P and E_c during the second period (407.3 mm) led to a progressive decrease in the EC to 2.47 mS cm^{-1} ; 10.8% lower than the value recorded in August 2008 (Fig. 3b).

Salinity in irrigation water reduces crop yields once the salinity exceeds a crop-specific threshold (Ayers and Westcot, 1985). The salinity of water stored in AWRs usually increases in arid and semi-arid regions due to the negative water balance between P and E_c . Maintaining a positive water balance in a SSCC covered storage may reduce the risk of crop yield loss associated with irrigation salinity and produce agronomic benefits when low quality water is stored for irrigation (Parry et al., 2005). For example, in a greenhouse production system, bell pepper yield was reduced by 12% when the salinity of the irrigation water increased from 0.50 to 3.20 mS cm^{-1} when grown in sand, and from 0.70 to 2.40 mS cm^{-1} when grown in volcanic tuff (Ben-Gal et al., 2008). Our data showed the EC reduced from 2.71 mS cm^{-1} , prior to the cover being installed, to 2.47 mS cm^{-1} one year later, resulting in a decrease over the second year of 0.24 mS cm^{-1} (Fig. 3b).

Overall, installation of the SSCC over the experimental AWR reduced evaporative loss by 85%, with the rain passing through the cover effectively reducing the electrical conductivity of the water during 2008, due to the positive water balance.

3.3. Effects of SSCC on chlorophyll-*a* concentration, turbidity and dissolved oxygen

Chl-a was monitored to indicate changes in the photosynthetic productivity of unicellular algae (Fig. 3c). Throughout the trial period, *Chl-a* did not vary significantly with depth, the thermal gradient period included. During the first year of the trial over the summer period, the increase in *Chl-a* closely followed the rise in water temperature. After the installation of the cover, despite the seasonal increase in the surface water temperature, the *Chl-a* remained very low until autumn rains mixed the different layers of the water in the storage. The SSCC reduced light intensity by 99% and excluded wind turbulence, minimising wave action and water mixing in the storage. Under these conditions, the activity of photosynthetic algae was severely limited. The increase in *Chl-a* coinciding with autumn rainfall indicates that some algae tolerated the prolonged shading, competing with heterotrophic bacteria for dissolved organic carbon (Furusato et al., 2004). The water turnover responsible for disrupting the thermal gradient in the storage appeared to re-suspend nutrients and algal cells from the sediment, stimulating microbial activity in the water column (Fig. 3c). *Chl-a* is not a precise indicator of algal population dynamics, as cellular chlorophyll concentrations change with temperature and light intensity, and with algal species (Baulch et al., 2009). However, results for *Chl-a* and turbidity (W_t) were very similar in both years, indicating that primary productivity in the stored water was substantially reduced after the SSCC was installed.

W_t provides an estimate of the suspended solids (physical and biological particles including algae) in the water. Throughout the trial period, W_t did not vary significantly with depth, the thermal gradient period included. Therefore, W_t data were graphed as the average of all of the monitored depths (Fig. 3c). The change in W_t was very similar to *Chl-a*, with a seasonal increase in the first summer, dropping substantially after the installation of the SSCC excluding light and wind from the storage. Water turbulence associated with the autumn rain in the second year increased turbidity, but it remained well below the minimum value prior to the installation of the SSCC. The lowest readings for W_t (0.15 NTU) coincide with the water thermal gradient that occurred from May to November in 2008. These results suggest that during the calm summer period, most of the particulate matter in the water fell to the bottom as sediment. Remixing of the water after autumn rains re-suspended some of the particles, but the drop in concentration relative to January 2009 indicates that heterotrophic microbial activity over the summer period may have reduced the concentration of organic matter in the water.

During the first year of the trial, *DO* did not vary with depth due to the isothermal behaviour of the AWR. During the second year (covered AWR), despite the significant change in the temperature depth profile over the summer period (thermal gradient), the *DO* readings from the different depths were not significantly different. Therefore, the mean *DO* value for each month was used for data presentation (Fig. 3c). *DO* values during the first year of the trial remained consistently high over the summer period, due to the oxygen released by photosynthetically active algae and wave action. Over the cooler winter months when algal photosynthesis was lower (Fig. 3c), the *DO* remained high due to the inverse relationship between water temperature and *DO*. However, the *DO* dropped substantially once the SSCC was installed, in part due to the increase in water temperature over the summer, but primarily due to the lack of wind turbulence and light penetration. Under the SSCC, lack of turbulence and the thermal gradient of the water have substantially reduced the oxygen transfer rate, and lack of light has substantially reduced the photosynthetic activity of the algae. The oxygen concentration in the air boundary layer under most micrometeorological conditions is high and constant, whereas *DO* in the water boundary layer depends on the rate of molecular diffusion (Gladyshev, 2002). Installing the SSCC increased the temperature of the air, with the reduction in the difference between the temperature of the air and the water surface and lack of turbulence inducing a warm, thermally stable surface film. The gravitational stability of a warm surface film increases the resistance to molecular diffusion, reducing the transfer rate of poorly water-soluble gases such as oxygen. The water turnover event in September to November 2008 re-oxygenated the water, but the concentration remained well below the November 2007 level recorded in the absence of the cover (Fig. 3c).

Despite the increase in *Chl-a* and W_t associated with the autumn rainfall and the water turnover, *DO* levels remained low until the water became cooler in January 2009. These results suggest that the observed increase in *Chl-a* under the cover was due to heterotrophic algal activity, with the extreme shade inhibiting photosynthesis (Furusato et al., 2004). Many algae and cyanobacteria of various taxonomic groups are capable of mixotrophy (phototrophy and heterotrophy), reverting to heterotrophy in the absence of light. As heterotrophs, any increase in *Chl-a* under the cover should increase the demand for *DO*. The observed rise in *DO* monitored under the SSCC occurred after autumn rains in September–November 2008 had re-mixed the water. Besides, the reduction in water temperature over the winter would have restricted microbial activity (Fig. 3c).

DO is an important irrigation water quality parameter that may limit plant growth in some intensive agricultural systems (Bhattarai et al., 2005). For example, reducing the *DO* to about 3 mg L^{-1} in a hydroponic production system reduced the growth of vegetable crops (Marfà et al., 2005). In our study, the installation of the SSCC depleted *DO* to below 3 mg L^{-1} within 4 weeks (Fig. 3c). Similar reductions in *DO* have been observed by Chen et al. (2009) within 4 days after the installation of shade covers. Bonachela et al. (2007) also reported a *DO* reduction in covered on-farm AWRs fed with treated wastewater located in a nearby area, but they did not find low *DO* values in covered on-farm AWRs fed with fresh water. However, hypoxic water can be re-oxygenated by using a well designed drip irrigation system (Maestre-Valero and Martínez-Alvarez, 2010). Irrigation water passing through drip irrigation systems can be re-oxygenated as the water circulates through the pump, passes through the emitters, and seeps into the soil. In the field trial in the SRB, the final *DO* in the silty clay loam soil 24 h after drip irrigation with hypoxic water ranged from 3.77 to 5.32 mg L^{-1} , which were above the published critical *DO* thresholds for plant growth (Morard, 1995).

4. Conclusions

Over the 2-year trial period, the high evaporation reduction associated with the installation of the SSCC induced a positive balance between P and E_c , conserving water and improving water quality by reducing the EC . Water was only added to the AWR to replenish the water level after summer and prior to the installation of the cover, no water was abstracted for irrigation. In practice, most AWRs would be refilled several times over the year to replenish abstracted irrigation water. Therefore, the quality of the AWR would be a function of P and E_c , and the quality and quantity of water used to refill the storage. In the absence of a cover, the water remained isothermal due to wind turbulence, with the $Chl-a$ increasing over the warmer summer period. After the SSCC was installed, within 2 months both the $Chl-a$ and W_t sharply decreased well below the initial concentrations in the AWR. Lack of turbulence under the cover induced a thermal gradient in the water from May to November 2008. Then the layers with different temperature in the water mixed following heavy autumn rains. Associated with the autumn rain, $Chl-a$ levels and W_t increased slightly, but remained well below the initial concentrations recorded in April 2007. These results suggest that excluding wind increased the rate of sedimentation of suspended particles, and excluding light restricted microbial metabolism to heterotrophy. Therefore, SSCCs are an effective technique for minimising algal blooms in AWRs during warmer months, saving on the cost of algicides as well as reducing filtration costs for drip irrigation.

The exclusion of wind and light by the SSCC substantially reduced the DO of the water to levels that may reduce the productivity of some vegetable crops. The overturning event and autumn rains that occurred in October and November 2008 briefly increased the DO to 3 mg L^{-1} , still well below oxygen saturation recorded over the same period in 2007 prior to the cover being installed. However, the hypoxic condition of the water supply can be remedied if the emitter type and water flow rate are selected to maximise re-oxygenation.

In summary, the water quality changes associated with the installation of a SSCC offer many advantages for drip irrigation. More water is conserved and the positive water balance decreased the EC . The reduction in suspended particles reduces filtering requirements and the risk of emitter clogging, significantly improving water and energy use efficiency especially when low quality water is stored. The water saved and the improvements in drip emitter reliability and irrigation uniformity associated with the installation of an SSCC should be included in an economic analysis of the cost-effectiveness of investing in these systems.

Acknowledgements

The authors acknowledge the Ministerio de Ciencia e Innovación (Spain) for the financial support of this study through the grant AGL2010-15001.

References

Adin, A., Rubinstein, L., Zilberman, A., 1989. Particle characterization in wastewater effluents in relation to filtration and irrigation. *Filtration and Separation* 26 (4), 284–287.

Adin, A., Sacks, M., 1991. Dripper clogging factors in wastewater irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 117 (6), 813–826.

Ali, S., Ghosh, N.C., Singh, R., 2008. Evaluating best evaporation estimate model for water surface evaporation in semi-arid region India. *Hydrological Processes* 22 (8), 1093–1106.

Ayers, R.S., Westcot, D.W., 1985. Water quality for agriculture. Irrigation and Drainage. Paper 29. FAO, Rome, 174 pp.

Baulch, H., Turner, M., Findlay, D., Vinebrooke, R., Dohahue, W., 2009. Benthic algal biomass – measurements and errors. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* 66, 1989–2001.

Ben-Gal, A., Ityel, E., Dudley, L., Cohen, S., Yermiyahu, U., Presnov, E., Zigmond, L., Shani, U., 2008. Effect of irrigation water salinity on transpiration and on leaching requirements: a case study for bell peppers. *Agricultural Water Management* 95, 587–597.

Bhattarai, S.P., Su, N., Midmore, D.J., 2005. Oxygenation unlock yield potentials of crops in oxygen limited soil environments. *Advances in Agronomy* 88, 313–377.

Bonachela, S., Acuña, R.A., Casas, J., 2007. Environmental factors and management practices controlling oxygen dynamics in agricultural irrigation ponds in a semi-arid Mediterranean region: implications for pond agricultural functions. *Water Research* 41, 1225–1234.

Brainwood, A., Burgin, S., Maheshwari, B., 2004. Temporal variations in water quality of farm dams: impacts of land use and water sources. *Agricultural Water Management* 70, 151–175.

Bucks, D., Nakayama, F., 1991. Water quality in drip/trickle irrigation: a review. *Irrigation Science* 12 (4), 187–192.

Chen, X., Kong, H., He, S., Wu, D., Li, C., Huang, X., 2009. Reducing harmful algae in raw water by light-shading. *Process Biochemistry* 44, 357–360.

CHS, 1997. Plan Hidrológico de la Cuenca del Segura. Confederación Hidrográfica del Segura, Ministerio de Medio Ambiente.

CHS, 2007. Estudio General sobre la Demarcación Hidrográfica del Segura. Confederación Hidrográfica del Segura, Murcia.

Craig, I., Green, A., Scobie, M., Schmidt, E., 2005. Controlling evaporation loss from water storages. NCEA Publication No. 1000580/1, Queensland, 207 pp.

Daigo, K., Phaovattana, V., 1999. Evaporation and percolation control in small farm ponds in Thailand. *Jarq-Japan Agricultural Research Quarterly* 33 (1), 47–56.

Downing, J.A., Prairie, Y.T., Cole, J.J., Duarte, C.M., Tranvik, L.J., Striegl, R.G., McDowell, W.H., Kortelainen, P., Caraco, N.F., Melack, J.M., Middelburg, J.J., 2006. The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments. *Limnology and Oceanography* 51, 2388–2397.

Finn, N., Barnes, S., 2007. The benefits of shade-cloth covers for potable water storages. CSIRO Textile & Fibre Technology. CSIRO, 42 pp.

Furusato, E., Asaeda, T., Manatunge, J., 2004. Tolerance for prolonged darkness of three phytoplankton species, *Microcystis aeruginosa* (Cyanophyceae), *Scenedesmus quadricauda* (Chlorophyceae), and *Melosira ambigua* (Bacillariophyceae). *Hydrobiologia* 527, 153–162.

Gállego-Elvira, B., Baille, A., Martín-Górriz, B., Maestre-Valero, J.F., Martínez-Alvarez, V., 2011. Energy balance and evaporation loss of an irrigation reservoir equipped with a suspended cover in a semi-arid climate (south-eastern Spain). *Hydrological Processes* 25, 1694–1703.

Gladyshev, M., 2002. Biophysics of the Surface Microlayer of Aquatic Ecosystems. Intl. Water Assn Publishing, London, UK, 160 pp.

Hudson, N.W., 1987. Soil and Water Conservation in Semi-arid Regions. FAO, Land and Water Conservation Service, Rome, 256 pp.

Karico, 2000. Technical report (I): the survey of pollution sources of water for the agricultural use (in Korean). Korean Agricultural and Rural Infrastructure Cooperation, pp. 1–626.

Maestre-Valero, J.F., Martínez-Alvarez, V., 2010. Effects of drip irrigation systems on the recovery of dissolved oxygen from hypoxic water. *Agricultural Water Management* 97, 1806–1812.

Marfà, O., Cáceres, R., Guri, S., 2005. Oxyfertilization: a new technique for soilless culture under mediterranean conditions. *Acta Horticulturae* 697, 65–72.

Martínez-Alvarez, V., Baille, A., Molina-Martínez, J.M., González-Real, M.M., 2006. Efficiency of shading materials in reducing evaporation from free water surfaces. *Agricultural Water Management* 84, 229–239.

Martínez-Alvarez, V., González-Real, M.M., Baille, A., Maestre-Valero, J.F., Gállego-Elvira, B., 2008. Regional assessment of evaporation from agricultural irrigation reservoirs in a semi-arid climate. *Agricultural Water Management* 95, 1056–1066.

Martínez-Alvarez, V., Calatrava-Leyva, J., Maestre-Valero, J.F., Martín-Górriz, B., 2009. Economic assessment of shade-cloth covers for agricultural irrigation reservoirs in a semi-arid climate. *Agricultural Water Management* 96, 1351–1359.

Morard, P., 1995. Etude de l'oxygénation du système racinaire. Publications Agricoles S.A.R.L. Les cultures végétales hors-sol. Agen, France, pp. 245–252.

Parry, M.A.J., Flexas, J., Medrano, H., 2005. Prospects for crop production under drought: research priorities and future directions. *Annals of Applied Biology* 147 (3), 211.

Ravina, I., Paz, E., Sofer, Z., Marcu, A., Schischa, A., Sagi, G., 1992. Control of emitter clogging in drip irrigation with reclaimed wastewater. *Irrigation Science* 13, 129–139.

Sperling, E., Da Silva, A.C., Lodolf, L.N., 2008. Comparative eutrophication development in two Brazilian water supply reservoirs with respect to nutrient concentrations and bacteria growth. *Desalination* 226, 169–174.

5.2. Publicación 2

5.2.1. Resumen de la publicación

Título

Effects of drip irrigation systems on the recovery of dissolved oxygen from hypoxic water.

Introducción y objetivos

En las últimas décadas, la Cuenca del Segura (CS; región semiárida localizada en el sureste de España) ha sufrido una importante escasez de recursos hídricos, como consecuencia de la reducción de los recursos superficiales y del aumento de la demanda de agua, especialmente en la agricultura. Además los sistemas de riego tradicional se han transformado en sistemas de riego de alta frecuencia (riego localizado por goteo) con el fin de aumentar la eficiencia y la productividad del uso del agua en la agricultura.

Los sistemas de distribución del agua, organizados mediante turnos, no se ajustan adecuadamente a las exigencias de los sistemas de riego localizado, que requieren un suministro continuo de agua. Como consecuencia, muchos agricultores y comunidades de regantes se han visto obligados a la construcción de pequeñas balsas de riego con el fin de regular el suministro de agua para el riego de sus cultivos (Martínez-Alvarez et al., 2008).

El uso de balsas presenta varios inconvenientes: (i) la superficie ocupada por las balsas asciende a 5.000 ha y supone un 1,81% de la superficie regada en la cuenca, (ii) experimentan elevadas pérdidas de agua por evaporación que ascienden a 58 hm³ y equivalen al 8,3% del agua consumida por la agricultura en la CS (Martínez-Alvarez et al., 2008) y (iii) la elevada presencia de nutrientes en el agua almacenada favorece la proliferación de algas gracias a que puede provocar serios problemas de calidad del agua y afectar a los sistemas de aplicación mediante riego localizado (Karico, 2000; Sperling et al., 2008).

Entre las tecnologías propuestas para reducir las pérdidas de agua por evaporación (Brown, 1988), la instalación de las coberturas de sombreado suspendidas (CSSs) que pueden alcanzar factores de reducción de la evaporación entre 75 y 90% (Craig et al., 2005; Gallego-Elvira et al., 2010), son desde el punto de vista técnico, la opción más adecuada para reducir las pérdidas de agua en balsas de riego. Esta técnica consiste en la instalación de una estructura reticular ligera sobre la balsa, fabricada mediante un doble entramado de cables de acero o plástico, los cuales se apoyan en el

murete perimetral de la balsa o en postes de acero galvanizado anclados a zapatas o “muertos” de hormigón. Cuando la dimensión lateral de la balsa supera los 100 metros, se puede recurrir a la instalación de columnas de apoyo intermedio. Este doble entramado de cables sustenta a la cobertura de polietileno, cuya porosidad al aire y a la lluvia es un requisito fundamental para evitar sobreesfuerzos estructurales.

Como beneficio adicional, la instalación de una CSS, mejora la calidad del agua al reducir: (i) el crecimiento normal de algas al disminuir los niveles de radiación en la balsa y (ii) la entrada de suciedad y otras partículas arrastradas por el viento. Ambos efectos podrían resultar en una reducción de los requerimientos de filtrado en el riego por goteo (Martínez-Alvarez et al., 2009).

Maestre-Valero et al. (2009) identificó un posible inconveniente al sombreado de balsas de riego en términos de calidad de agua: una fuerte reducción de la concentración de oxígeno disuelto (*OD*) en el agua almacenada en una balsa cubierta que alcanza niveles medios anuales de 2 mg L^{-1} considerados hipóxicos. Otros investigadores también detectaron concentraciones de *OD* reducidas en balsas cubiertas suministradas con aguas tratadas en depuradora (Bonachela et al., 2007).

La reducción de *OD* en el agua se relaciona directamente con la habilidad de la cobertura para reducir la transmisión de la radiación solar (limitación del proceso de fotosíntesis) y el efecto del viento sobre la superficie del agua impidiendo la formación de olas (reducción de la oxigenación por difusión). Además, el *OD* se consume en la degradación aerobia de la materia orgánica (principalmente algas muertas).

EL *OD* es un parámetro de calidad del agua muy importante y puede llegar a ser un factor limitante en algunos sistemas de agricultura intensiva (Raviv et al., 2004; Bhattarai et al., 2005; Marfà et al., 2005). Una baja concentración de *OD* en el agua de riego puede tener consecuencias críticas como causar deficiencias de oxígeno en la raíz que afecten al desarrollo de la planta o que aumenten la probabilidad de sufrir enfermedades (Chèrif et al., 1997; Bhattarai et al., 2008).

Algunas técnicas se han desarrollado con el objetivo de aumentar el *OD* en el agua de riego como la aplicación de peróxido de hidrógeno o la instalación de aireadores tipo venturi en la instalación de riego (Huber, 2000; Goorahoo et al., 2001) y la mayoría de ellas se han comercializado.

Yun-kai et al. (2006) y Hezarjaribi et al. (2008) estudiaron el funcionamiento hidráulico de emisores en un sistema de riego por goteo, sin embargo no hay estudios

cuyo objetivo sea el estudio de la recuperación del *OD* en el sistema de riego. Estas consideraciones avalan el interés de valorar la dinámica del *OD* en un sistema de riego.

Los principales objetivos de este estudio fueron (1) analizar la recuperación de *OD* en el agua almacenada en una balsa cubierta con una CSS con una concentración de oxígeno muy baja en las diferentes etapas de un sistema de riego localizado (con diferentes emisores) y (2) estudiar los efectos sobre la oxigenación del agua de la instalación de un aireador tipo venturi en el sistema de riego.

Materiales y métodos

Diseño del sistema experimental de riego por goteo y funcionamiento de emisores

La instalación experimental de riego localizado consistió en cinco laterales de polietileno (diámetro 16 mm) de 20 metros de longitud. Cuatro de ellos se destinaron a los tratamientos de baja concentración de *OD* mientras que el quinto fue el tratamiento control. Dentro del grupo de los laterales destinados a agua con baja concentración de *OD*, tres de ellos se dotaron con emisores de riego localizado, mientras que el cuarto lateral se equipó con un inyector de aire tipo venturi (Modelo MAI-A03; Copersa S.A.).

Para distribuir los emisores alrededor de cada zona regada, se diseñaron tres estructuras planas cuadradas (0,5 m x 0,5 m) de polietileno formada por cinco líneas de 0,5 m. Esta estructura se insertó en el sistema de riego. Se seleccionaron tres clases de emisores de riego localizado atendiendo a sus características hidráulicas y por tanto a la turbulencia de su flujo. De este modo, EM1=2,96 L h⁻¹ (exponente de flujo $x = 0,50$ y coeficiente de descarga $k = 0,94$), fue un emisor con laberinto insertado en la línea porta-goteros y caracterizado por su flujo turbulento, EM2=2,22 L h⁻¹ ($x = 0,70$ y $k = 0,25$), fue un emisor pinchado en la línea porta-goteros y caracterizado por un flujo turbulento intermedio y EM3=2,22 L h⁻¹ ($x = 0,95$ y $k = 0,44$), fue un microtubo caracterizado por su flujo cuasi-laminar. En total, 9 EM1, 12 EM2 y 12 EM3 se usaron en el experimento.

El inyector de aire tipo venturi se instaló en el cuarto lateral de riego del grupo de los laterales destinados a agua con baja concentración de *OD*. Después de pasar el agua a través del inyector venturi, ésta fluyó directamente al suelo.

Cuatro muestreadores de agua subterráneos (Modelo SPS 25563; 550 mm y 63 mm en diámetro; Analab S.A.) se instalaron debajo de cada estructura plana de

5.2. PUBLICACIÓN 2

polietileno y en el tratamiento control para succionar el agua del suelo a la profundidad de 0,40 m.

Aproximadamente, se bombearon 80 L de agua al sistema de riego desde la balsa de riego durante 3 h. El agua que no se aplicó a los muestreadores se almacenó de nuevo en la balsa por medio de una línea de retorno. Varios manómetros se instalaron en el sistema de riego para regular la presión diferencial de riego a 1 atm y asegurar el buen funcionamiento de la misma y del inyector de aire. El agua del tratamiento control se obtuvo del transvase Tajo – Segura.

El agua se extrajo de los muestreadores subterráneos mediante una bomba manual de succión (Modelo SPS 400; Analab S.A.) que se conectó al muestreador mediante una goma de plástico flexible y aplicando un vacío de 75 Kpa.

Semanalmente se realizaron un total de nueve ensayos desde mayo a julio de 2009. La precipitación durante este periodo fue escasa y no afectó al desarrollo de los ensayos.

Agua usada en el ensayo

Los tratamientos con baja concentración de *OD* se abastecieron con agua procedente de la balsa de riego cubierta, donde los niveles de *OD* fueron muy bajos. Una bomba centrífuga (Jn DP 800; 1,08 CV) se usó para este fin. Al inicio del experimento, la concentración de *OD* fue de 1,08 mg L⁻¹, aunque el *OD* en la balsa de riego osciló entre 0 y 1,08 mg L⁻¹ durante el periodo de experimentación.

Agua procedente del transvase Tajo-Segura se usó para abastecer al lateral control. La concentración de *OD* media del tratamiento control fue de 7,54 mg L⁻¹ durante el periodo de experimentación mostrando pocas variaciones.

Ensayos y medidas

Los ensayos se llevaron a cabo entre mayo y julio de 2009 en la Estación Experimental de Investigación Agroalimentaria “Tomas Ferro”, de la Universidad Politécnica de Cartagena (La Palma, Murcia).

La concentración de *OD* se determinó mediante un oxímetro portátil (Modelo HI914610; Hanna Instruments; 0,01mg L⁻¹ de resolución) en diferentes puntos de muestreo: (i) en la balsa de riego (*OD*_{ba}), después de la bomba (*OD*_{bo}), después de los emisores (*OD*_e), después del inyector venturi (*OD*_{iv}), dentro de los muestreadores de

agua subterráneos veinticuatro horas después del riego (OD_s) y en el transvase Tajo – Segura (OD_c).

Adicionalmente, se calcularon los incrementos de OD (ΔOD) en cada uno de los puntos de muestreo. De modo que ΔOD_1 se corresponde con el incremento de OD en la circulación del agua en la bomba, ΔOD_2 se corresponde con el paso de agua por los emisores, ΔOD_3 se corresponde con el incremento de OD en el suelo, ΔOD_I es el incremento de OD en el inyector de aire venturi y ΔOD_c se corresponde con el incremento de OD en suelo para el tratamiento control. Adicionalmente se calculó ΔOD_{IS} como sumatorio del incremento de OD en las etapas ΔOD_2 y ΔOD_3 .

Análisis estadísticos

Los datos se analizaron estadísticamente usando statgraphics Plus v.5.1, el cual ejecuta un análisis de la varianza (ANOVA) para detectar cualquier diferencia significativa entre los tratamientos en cada etapa del sistema de riego.

El test de Tukey, con un nivel de confianza del 95% se calculó para realizar la comparación entre tratamientos.

Resultados y discusión

Oxigenación del agua

Los resultados indican que la oxigenación del agua en su tránsito por la etapa ΔOD_1 fue similar para todos los tratamientos con una valor medio de $0,25 \text{ mg L}^{-1}$. Los valores de ΔOD_2 no mostraron diferencias significativas para los tratamientos EM1 y EM2. Sin embargo se encontraron diferencias significativas con el tratamiento EM3. El emisor de flujo turbulento (EM1) suministró $3,15 \text{ mg L}^{-1}$ (59,4% de la oxigenación total). El emisor con flujo intermedio (EM2) suministró $2,70 \text{ mg L}^{-1}$ (54,5% de la oxigenación total). El emisor con flujo laminar (EM3) suministró $1,56 \text{ mg L}^{-1}$ (41,4% de la oxigenación total). Con respecto a la oxigenación en ΔOD_3 , fue similar en todos los tratamientos, con una valor medio de $1,96 \text{ mg L}^{-1}$.

Los incrementos de OD en ΔOD_{IS} fueron: EM1 = $5,12 \text{ mg L}^{-1}$, EM2 = $4,70 \text{ mg L}^{-1}$ y EM3 = $3,48 \text{ mg L}^{-1}$. Al contrario que para los tratamientos de baja concentración de OD , ΔOD_c mostró valores negativos, lo cual indicó que cuando el agua con un nivel elevado de OD penetra en el suelo, esta transfiere oxígeno como consecuencia de su

mayor presión parcial de oxígeno con el objetivo de equilibrar el balance de presiones (Russell y Appleyard, 1915).

Finalmente la concentración de *OD* en el suelo (*ODs*) para el tratamiento control fue de 5,10 mg L⁻¹ mientras que para los tratamientos EM1, EM2 y EM3 fue 5,31 mg L⁻¹, 4,95 mg L⁻¹ y 3,77 mg L⁻¹ respectivamente. En este caso se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos control, EM1 y EM2 con respecto al tratamiento EM3.

Además los resultados indicaron que el ΔOD_3 para los tratamiento de baja concentración de *OD*, dependió de la presión parcial de oxígeno el suelo y de la temperatura del agua en el suelo. La temperatura de agua afecta la concentración de *OD* de modo que agua a mayor temperatura es capaz de retener menor cantidad de oxígeno (Brainwood et al., 2004). En este estudio ΔOD_3 fue aproximadamente 29 – 30,1% de la oxigenación total, siendo entre 3,6 – 6,2% consecuencia del incremento de temperatura en el suelo.

Recomendaciones de riego

De acuerdo a los resultados presentados en este estudio, se exponen las siguientes recomendaciones de riego con agua hipóxica:

- Morard (1995) indicó que el umbral mínimo de concentración de *OD* es de 3 mg L⁻¹ para cultivo hidropónico. Bajo los condicionantes de este sistema de riego, el agua no tiene oportunidad de oxigenarse y sería recomendable el uso de aireadores tipo venturi.
- La oxigenación del agua en la etapa ΔOD_2 dependió del tipo de emisor, siendo los emisores con un flujo más turbulento los que aumentaron en mayor medida la concentración de *OD* en el agua de riego. Los resultados de los tres tratamientos EM1, EM2 y EM3 superaron los niveles críticos indicados en la literatura.
- Para riego subterráneo con agua hipóxica, la instalación de aireadores tipo venturi permiten incrementar la concentración de *OD* en la zona radicular (Bhattarai et al., 2008).

Conclusiones

Este estudio presenta un análisis de los efectos de un sistema típico de riego por goteo sobre la recuperación de *OD* en agua con baja concentración de *OD* como la que se

almacena en una balsa cubierta. El sistema de riego experimental oxigenó el agua de riego en todas sus etapas. ΔOD_1 tubo poca relevancia en la oxigenación del agua. ΔOD_2 fue la etapa donde más oxigenación se registró, siendo los emisores EM1 y EM2, caracterizados por su flujo más turbulento los que obtuvieron mayores incrementos. ΔOD_3 no mostró diferencias significativas entre tratamientos y contribuyo significativamente a la oxigenación del agua.

El riego superficial con agua con una concentración elevada de OD desde un canal abierto sufrió una gran reducción cuando se infiltró en el suelo debido a la alta presión parcial de oxígeno en el agua de riego comparada con la del agua en el suelo.

5.2.2. Copia de la publicación

Agricultural Water Management 97 (2010) 1806–1812



Contents lists available at ScienceDirect

Agricultural Water Management

journal homepage: www.elsevier.com/locate/agwat

Effects of drip irrigation systems on the recovery of dissolved oxygen from hypoxic water

J.F. Maestre-Valero*, V. Martínez-Alvarez

Universidad Politécnica de Cartagena, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Paseo Alfonso XIII, 48, 30203 Cartagena, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 10 November 2009

Received in revised form 28 June 2010

Accepted 30 June 2010

Available online 24 July 2010

Keywords:

Water quality
Drip irrigation
Water oxygation
Emitters
Venturi air injector
Shade-cloth cover

ABSTRACT

The dissolved oxygen concentration (DOC) is an important irrigation water quality parameter that can become a limiting factor in some intensive agriculture systems. A low DOC in the irrigation water may have critical consequences because it causes root oxygen deficiency, which in turn can result in agronomic problems. The aim of this study was to improve the understanding of the dynamics of the DOC in hypoxic irrigation water when passing throughout a surface drip irrigation system (DIS) and seeping into the soil. To this end, an experimental DIS consisting of three types of commercial emitters and a venturi air injector, installed in-line, was set up for evaluation. Furthermore, subsurface water samplers were buried to catch the water in the soil. The trials were conducted with water from two different sources. The control treatment was performed with fresh channel water, which had a high DOC (7.54 mg L^{-1} ; 92.2% saturation), and the low DOC treatments were supplied from a covered agricultural reservoir and had DOC values less than 1.08 mg L^{-1} (10.8% saturation). After the low DOC treatments, the final DOC in the soil 24 h after irrigation ranged from 3.77 mg L^{-1} to 5.31 mg L^{-1} (47.2% to 65.2% saturation). There was an increase in the DOC in all stages of the experimental DIS, which was more important in the water passing through the emitters. The main factor determining the final DOC was the type of emitter, where DOC differences were correlated to their flow performance. The control treatment reached a similar DOC in the soil 24 h after irrigation, indicating that using hypoxic water under DIS does not affect the final soil DOC. Finally, the application of a venturi air injector increased the DOC in the low DOC source up to values typically found in open channels and reservoirs.

© 2010 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Over the last few decades there have been significant shortages in water for irrigation in the Segura River Basin (SRB; semi-arid region of south-eastern Spain), primarily arising because of the continuous decrease of surface water resources and the increasing demand of water, especially in agriculture. Furrow irrigation has been almost entirely replaced by drip irrigation systems (DIS) in an effort to improve water use efficiency in agriculture. Currently, drip irrigation takes up 203,775 ha in this region, or approximately 64.8% of the irrigated land.

In the SRB, the irrigation distribution systems are organised based on turns. As a result, it is difficult to properly fit them with modern DIS that require continuous water supply. To solve this problem, many farmers and water agencies use on-farm Agricultural Water Reservoirs (AWRs) to guarantee water supply throughout the irrigation season (Ali et al., 2008; Daigo and Phaovattana, 1999; Martínez-Alvarez et al., 2006). However, there

are at least two drawbacks to the on-farm AWRs approach. First, AWRs can experience significant evaporation losses in arid and semi-arid climates (Martínez-Alvarez et al., 2008). Second, as a result of their important nutrient load, AWRs experience frequent algal blooms, resulting in serious water quality problems (Brainwood et al., 2004; Karico, 2000).

One of the most promising techniques for mitigating evaporation losses and improving the water quality in on-farm AWRs is the use of suspended shade-cloth covers. This method consists in covering the AWR surface with a shade cover that is supported by a double reticulated frame structure made of steel or polyamide cables. The cables are anchored either into the storage wall or to galvanised steel posts bolted to concrete footings. A black double polyethylene fabric is then attached between the frames and suspended over the AWR.

Shading on-farm AWRs affects the quality of the stored water (Craig et al., 2005; Finn and Barnes, 2007). Water quality can be improved by (1) lowering sunlight levels, thus reducing algal photosynthesis and preventing algal growth, and (2) keeping wind-borne dust and debris out of the AWR. Both of these effects could result in a beneficial reduction of filtration requirements for drip irrigation (Martínez-Alvarez et al., 2009). However, Maestre-Valero et al.

* Corresponding author. Tel.: +34 968 32 70 52; fax: +34 968 32 54 33.
E-mail address: josef.maestre@upct.es (J.F. Maestre-Valero).

(2009) identified a possible downside to shading AWRs in terms of water quality: a reduction of dissolved oxygen concentration (DOC) in the stored water throughout the year. These authors compared water quality in three nearby on-farm AWRs, one of which was covered while the other two were uncovered for an entire year, recording the average annual DOC of approximately 2 mg L^{-1} in the covered AWR and 8 mg L^{-1} (near saturation) in the uncovered AWRs. Bonachela et al. (2007) also reported a DOC reduction in covered on-farm AWRs fed with treated wastewater located in a nearby area. However, these authors did not record low DOC values in covered on-farm AWRs fed with fresh water. Normal values most likely arose due to (1) low nutrient and microorganism load in the AWRs fed with fresh water, (2) shade-cover deterioration that allows a higher percentage of solar radiation transmission and (3) high irrigation regulation frequency to supply greenhouses in the surrounding area and therefore a continuous renovation of the stored water in the AWR (Bonachela S., personal communication, January 2010).

The reduction of DOC in the stored water of covered AWRs is directly correlated with the ability of the cover to block both wind and solar radiation. Gallego-Elvira et al. (submitted for publication), while studying the effects of shade covers on the driving variables of evaporation, detected a high reduction of wind velocity (90%; with a complete absence of waves) and solar radiation (1% transmission) under the cover. These effects are enough to impede photosynthesis and water oxygation by waves, which are typically natural processes. The high reduction of solar radiation encourages the respiration of algae, leading to oxygen consumption. Furthermore, oxygen is consumed through the aerobic decomposition of the organic matter (primarily dead algae).

DOC is an important irrigation water quality parameter that can be a limiting factor in some intensive agriculture systems (Bhattarai et al., 2005; Marfà et al., 2005; Raviv et al., 2004). A low DOC in the irrigation water may have critical consequences, as it causes root oxygen deficiency which in turn can lead to agronomic problems such as crop stress, slow plant growth, or low yields (Bhattarai et al., 2008). Moreover, oxygen deficiency in the root zone of plants can lead to poor root and plant performance and an increase in disease (Chérif et al., 1997). For example, for hydroponically grown vegetable crops, Morard (1995) set the critical oxygen partial pressure at 4–6% of the irrigation nutrient solution. It corresponds with DOC values of approximately 3 mg L^{-1} . However, Armstrong and Drew (2002) indicated that this DOC threshold must be assumed with caution, since oxygen content in the root media is continuously varying in field conditions and the first DOC deficiencies are difficult to determine, since they depend upon oxygen demand and the magnitude of oxygen sources. Bonachela et al. (2010) working with tomato crops grown on rockwool slabs and irrigated with treated waste water with low DOC did not observe any reduction of crop yield or tomato fruit quality, although DOC values in the substrate solution were always around 5 mg L^{-1} and lower than 3 mg L^{-1} for as short time during their experiment.

The agronomic problems related to the low DOC of irrigation water can be prevented using a wide variety of oxygen enrichment methods. These methods, such as hydrogen peroxide application and in-line installation of venturi air injectors, have primarily been studied in subsurface DIS (Goorahoo et al., 2001; Huber, 2000) and most of them have already been commercialised. Bhattarai et al. (2004), Goorahoo et al. (2001) and Marfà et al. (2005) observed a higher yield when several crops were irrigated with oxygen enriched water.

Several researchers (Hezarjaribi et al., 2008; Yun-kai et al., 2006) have studied the hydraulic and flow performances of emitters in DIS, but no work in the literature has been found addressing the effect of DIS on the recovery of DOC when hypoxic irrigation water is used. On the other hand, when this kind of irrigation is practised,

the oxygen in the air above the soil is the only source of oxygen to increase the oxygen levels in the air and liquid phases in the soil and the rate that the oxygen can move into and through the soil depends on the oxygen gradient and the diffusion coefficient. The oxygen diffusion process, defined as molecular oxygen movements from high concentration to low concentration as a result of an oxygen concentration gradient, and the oxygen diffusion coefficient have been well documented in the literature (Letey et al., 1962; Russell and Appleyard, 1915; Stolzy and Letey, 1964).

These considerations underpin the interest to assess the dynamics of DOC along the DIS and inside the soil with hypoxic water. In particular, the main goals of this study were (1) to analyse DOC recovery in water from a hypoxic on-farm AWR passing through a DIS with three different types of emitters, and (2) to explore the effects of installing a venturi air injector in the DIS to determine whether this is an advisable and effective measure to increase DOC in drip irrigation practices.

2. Materials and methods

2.1. Drip irrigation system design and emitter performance

The experimental design (Fig. 1) consisted of a hydraulic system with five laterals, which were made using 20-meter-long polyethylene drip irrigation pipes (diameter 16 mm). The first four laterals were devoted to the low DOC treatments, whereas the fifth was the control treatment lateral, which received water with high DOC (near saturation). The first three low DOC treatment laterals were fitted with surface drip irrigation emitters while the fourth, lacking emitters, was equipped with a Mazzei venturi air injector (Model MAI-A03; Copersa S.A.).

To hold and distribute the emitters around the irrigation area of each treatment, a plane hydraulic structure was designed using polyethylene irrigation pipe (diameter 16 mm). The structure consisted of five stretches of 0.5 m length. Four of them were connected using irrigation connections and forming a square ($0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$) whereas the last one split this structure in two equal rectangles. Each plane structure was inserted in-line in each one of the first three low DOC treatment laterals. Three different types of commercial drip emitters commonly used in the SRB (from now on referred to as EM1, EM2 and EM3) were used in the experiment. Each type of emitter was inserted in each plane polyethylene structure (Fig. 1).

The emitters for the experiment were selected according to flow regime criteria (turbulent to laminar). EM1 was an inserted in-line labyrinth emitter; its nominal flow was 2.96 L h^{-1} at 1 atm, and it was classified as a turbulent flow emitter. EM2 was a punched on-line emitter; its nominal flow was 2.22 L h^{-1} at 1 atm, and it was classified as an intermediate turbulent flow emitter. EM3 was an on-line micropipe typically used in pots and greenhouses; its nominal flow was 2.22 L h^{-1} at 1 atm, and it was classified as a quasi-laminar flow emitter. In total, nine EM1 emitters, twelve EM2 emitters and twelve EM3 emitters were used in the experiment to supply the same irrigation water flow (26.64 L h^{-1}) in the irrigation area of each treatment.

The hydraulic performance of the emitters can be described by the following potential equation (Keller and Karmelli, 1975):

$$q = kp^x \quad (1)$$

where q is the emitter flow rate (L h^{-1}); k is the discharge coefficient, which is a constant of proportionality that characterises each emitter; p is the working pressure head at the emitter ($\text{m H}_2\text{O}$), and x is the emitter flow-rate exponent, which characterises the flow regime and the q vs. p relationship. The sensitivity of an emitter discharge to p depends mainly on the values of x . Exponents $x = 1$ and $x = 0.50$ correspond to the laminar and the turbulent flow regimes,

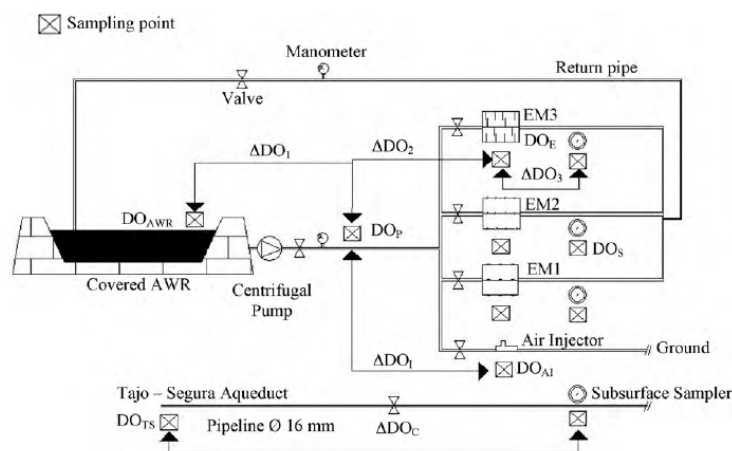


Fig. 1. Field experimental design and dissolved oxygen concentration sampling points in the experiment.

respectively. EM1 had the lowest flow rate exponent ($x = 0.50$) and had a k of 0.94, EM3 had the highest flow rate exponent ($x = 0.95$) and a k of 0.44, and EM2 had an intermediate flow regime ($x = 0.70$) and a k of 0.25.

The venturi air injector was connected in the fourth lateral according to the methods described by Goorahoo et al. (2001). The air suction through the venturi injector tube abides by Bernoulli's principles (Anon., 2003; Goorahoo et al., 2001). After passing through the venturi and a small stretch of pipe, the water flowed directly on the ground (Fig. 1).

A manometer and a valve installed at the inlet and at the outlet of the DIS (Fig. 1) were used to set the working differential pressure at 1 atm in all of the low DOC treatments.

Subsurface water samplers (Model SPS 25563; 550 mm long and 63 mm in diameter; Analab S.A.) were buried in the soil at a depth of 0.4 m. They were located beneath each plane structure in the low DOC treatments, and at the end of the lateral used for the control treatment (Fig. 1). Approximately 80 L of water were applied during a 3-h interval in each irrigation area where the subsurface water samplers were buried. The remaining water was continuously returned into the AWR by means of a return pipe. A manual suction pump (Model SPS 400; Analab S.A.) was connected to the top of the subsurface water sampler by means of a flexible plastic pipe. It allowed to apply a vacuum (75 kPa) for getting the soil water flowing into the sampler and then obtaining soil water samples.

2.2. Water sources

Water used in the experiment was taken from two different sources. Water for the four low DOC treatments was obtained from a hypoxic covered AWR with a total capacity of 11,920 m³. The AWR was filled with fresh water from the Tajo-Segura aqueduct, a channel supplying a large part of the water used in the SRB for both human consumption and irrigation practices. Its water level was nearly constant during the experimental period, without inflows or outflows other than those caused by evaporation and rainfall. Water was extracted from the covered AWR by means of a centrifugal water pump (JN DP800; 1.08CV) and directly passed into the DIS (Fig. 1).

The covered AWR was filled several months prior to the trials to achieve water with a depleted DOC. The DOC fell from 8.95 mg L⁻¹ (95.2% saturation) at the time of the filling to 1.08 mg L⁻¹ (10.8% saturation) at the beginning of the experiment. The DOC in the AWR

slightly varied in each trial, ranging from 0 to 1.08 mg L⁻¹ during the experimental period.

The control treatment (fifth lateral) received water directly from the Tajo-Segura aqueduct. This water was used for flood irrigation in the irrigation area of this treatment. The average DOC in the Tajo-Segura channel was 7.54 mg L⁻¹ (92.2% saturation) throughout the entire experimental period, showing negligible variations.

2.3. Trial course and measurements

Prior to the trials, several tensiometers provided with transducers were installed and monitored during 2 weeks (in April 2009) to have an estimation of the weekly evolution of the soil water potential with the irrigation program (80 L during 3 h every week). The soil water potential was around -5 cbar when the soil was fully irrigated and this value fell until approximately -90 cbar at the end of each trial (1 week). These measurements underpin the interval between trials selected in the study. Additionally, the surface soil layer was worked to remove any presence of vegetation. Plants need a proper oxygen supply for good root development (Brandt et al., 1971) and presence of unwanted vegetation could have implications in the DOC measurements. The soil had a bare silty clay loam texture with a bulk density of 1.45 g cm⁻³.

The trials were conducted weekly from May to July 2009 at the University of Cartagena's Agricultural Experiment Station (latitude: 37°35'N and longitude: 0°59'W). A total of twelve trials were carried out in the duration of the experiment. Water was applied simultaneously in the five experimental laterals. Rainfall during the research period was very low and had no significant effects on the trial course.

The DOC was measured by means of a handheld DO meter (Model HI 914610; Hanna Instruments; 0.01 mg L⁻¹ resolution). It consists of a sensor (diameter 25 mm and length 196 mm) connected to a data-logger by means of a cable. Its dimensions are completely suitable to be introduced into the subsurface water sampler (diameter 63 mm). DOC was measured at different sampling points (Fig. 1): (1) in the AWR, named DO_{AWR} ; (2) after the centrifugal pumping, named DO_P ; (3) after passage through the emitters, named DO_E ; (4) after the venturi air injector, named DO_{AI} ; (5) in the Tajo-Segura aqueduct, named DO_{TS} , and (6) inside the subsurface water samplers, named DO_S . For the first five cases, the DOC was measured during the irrigation. The DO_{AWR} and DO_{TS} were measured directly by introducing the DO meter into the

water whereas the DO_P , DO_E and DO_{AI} were measured by collecting the water in a container, passing the water to a precipitate glass (2000 mL) while the DO meter was immediately and carefully introduced inside it. The container was rectangular: 0.20 m high, 0.55 m long and 0.55 m wide. These dimensions were slightly higher than the polyethylene plane structure (0.5 m \times 0.5 m) and thus the container allowed to collect samples of water (0.25 L) from the emitters during approximately 30 s in each trial. For the last sampling point, the DO_S was measured 24 h after the irrigation by carefully introducing the DO meter 0.35 m deep into each subsurface water sampler.

Increases in DOC (ΔDO) were calculated between each sampling point (Fig. 1). This allowed to avoid the effect of the slight variations in the initial DO_{AWR} value (ranging from 0 to 1.08 mg L⁻¹) for each trial measurement. The following ΔDO values were defined: ΔDO_1 corresponded to the circulation of the water through the pump ($DO_P - DO_{AWR}$), ΔDO_2 corresponded to the passing of the water through the emitters ($DO_E - DO_P$), ΔDO_3 corresponded to the DOC increase in the soil for the low DOC treatments ($DO_S - DO_E$), ΔDO_1 referred to the DOC increase due to the venturi air injector ($DO_{AI} - DO_P$), and ΔDO_C corresponded to the DOC increase in the soil for the control treatment ($DO_S - DO_{TS}$).

In addition, the sum $\Delta DO_2 + \Delta DO_3 = DO_S - DO_P$ was defined as the DOC recovery in the DIS (named ΔDO_{IS}), with the aim being to compare the results from the different drip irrigation treatments and from the flood irrigation treatment (ΔDO_C), where no pumping was applied.

After the DO_S measurement, a syringe equipped with a flexible plastic pipe was used to collect the water from the subsurface samplers. Water was collected and discarded to prevent disturbance between trials. Water temperature was also measured at each sampling point in each trial by means of a handheld DO meter, which allowed for an estimate of dissolved oxygen percent saturation.

2.4. Data statistical analysis

The data were statistically analysed by means of the statistical software package Statgraphics Plus (v.5.1), which performs analysis via a variance technique (ANOVA) to detect any significant differences between treatments at each stage of the irrigation process. Tukey's range test, at a 95% confidence level was calculated for comparison between treatments. DOC analyses were performed using the data from 12 weeks of trials.

3. Results and discussion

3.1. Effects of water temperature on dissolved oxygen concentration

The DOC is affected by water temperature because warm water can dissolve less oxygen gas than cold water (Brainwood et al., 2004). Table 1 presents the water temperature at each measurement point throughout the trials, as well as the average monthly water temperatures. During the experimental period, water temperature variation at each stage of the irrigation system was less than 2 °C. Therefore, its effect on the DOC measurements between trials was considered negligible.

3.2. Water oxygation

Fig. 2 presents the average and the standard deviation of the increases in DOC corresponding to the circulation of water through the pump (ΔDO_1), through the emitters (ΔDO_2) and seepage into the soil (ΔDO_3) for the low DOC treatments EM1, EM2 and EM3.

The ΔDO_1 value (Fig. 2a) was the same for the three treatments as a result of the experimental design (Fig. 1), with an average value

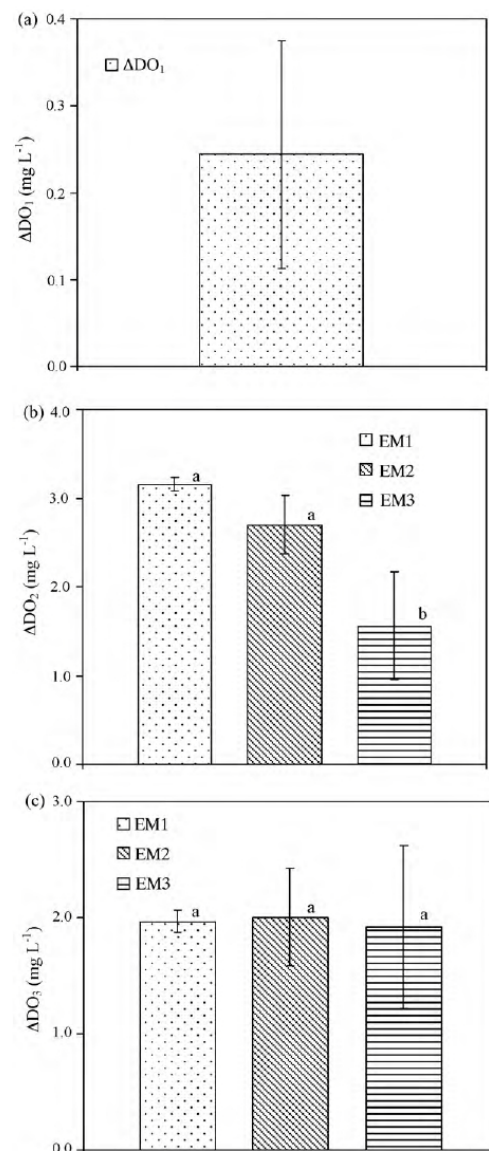


Fig. 2. Average dissolved oxygen concentration increases (ΔDO) corresponding to the circulation of the water (a) through the pump (ΔDO_1), (b) through the emitters (ΔDO_2) and (c) seepage into the soil (ΔDO_3) for the treatments EM1, EM2 and EM3. Vertical bars indicate the standard deviation. Columns with same letter indicate there are not significant differences between treatments.

of 0.25 mg L⁻¹. On average, this value contributed 5.5% to the total oxygation in the low DOC treatments. Such low water oxygation is caused by minor imperfections in the pumping system that may result in air intrusions due to pressures lower than 1 atm in the aspiration pipe and inside the pump.

The values of ΔDO_2 (Fig. 2b) did not reveal significant differences between the EM1 and EM2 treatments. However, there were considerable differences between EM1 and EM2 when compared to the EM3 treatment. The turbulent flow emitter (EM1) supplied

Table 1

Water temperature at each measurement point throughout the trials and average monthly water temperatures during the experimental period.

Sampling points		AWR	After pump	After emitters	Subsurface water samplers	Venturi injector	Tajo–Segura aqueduct
Weeks of experimentation							
1	May	15.6	16.6	17.8	27.0	16.7	24.5
2		15.9	16.9	18.1	27.4	17.0	24.7
3		15.8	16.8	17.9	27.2	16.9	25.1
4		15.8	16.8	18.0	27.3	16.9	24.9
Mean	June	15.8	16.8	18.0	27.2	16.9	24.8
5		15.9	16.9	18.1	27.3	17.0	25.2
6		16.1	17.2	18.3	26.9	17.7	25.6
7		16.5	17.4	18.4	27.3	17.1	26.2
8	July	17.0	17.2	18.7	27.8	17.2	26.8
Mean		16.4	17.2	18.4	27.3	17.3	26.0
9		16.7	17.1	18.2	27.5	17.9	28.6
10		17.1	17.6	18.3	27.6	17.8	27.2
11		16.8	17.3	18.5	27.7	18.7	29.2
12		16.3	17.0	18.6	27.9	17.8	29.3
Mean		16.7	17.3	18.4	27.7	18.1	28.6

an average ΔDO_2 of 3.15 mg L^{-1} to the water, contributing 59.4% to the total oxygation. The intermediate flow emitter supplied 2.70 mg L^{-1} to the water, thus contributing 54.5% to the total oxygation. Finally, the laminar flow emitter (EM3) contributed an average DOC of 1.56 mg L^{-1} , or 41.4% of the total oxygation.

With respect to the seepage of water into the soil (ΔDO_3), there were no significant differences in water oxygation levels between the different treatments (Fig. 2c). The average DOC contribution to the three treatments was 1.96 mg L^{-1} . On average, this value represented 42.8% of the total oxygation.

The above results have several implications: (1) water oxygation at ΔDO_1 has very little relevance compared to that at ΔDO_2 and ΔDO_3 ; (2) there are no differences between treatments at ΔDO_3 , and (3) ΔDO_2 is clearly influenced by the type of emitter used, as those emitters having a lower flow rate exponent provide more water oxygation because of their greater turbulent flow performance.

At the emitter stage, the standard deviation of DOC (Fig. 2b) depended on the type of emitter used. The value was approximately 0.08 mg L^{-1} for the EM1 treatment, 0.32 mg L^{-1} for the EM2 treatment and 0.60 mg L^{-1} for the EM3 treatment. This variation could arise from the difference in water application uniformity between the different types of emitters. Kirnak et al. (2004) studied the hydraulic performance of several drip irrigation emitters and concluded that the flow regime is an important factor that conditions the water application uniformity: emitters having a higher flow rate exponent, x , (laminar flow regime) have less water application uniformity. Therefore, the differences between the emitters flow performance could explain the observed trend in increasing standard deviations.

In regards to the recovery of the DOC in the DIS (ΔDO_{1S}), Fig. 3 represents its average and standard deviation values for EM1, EM2 and EM3 treatments, and also shows the decrease in DOC in the soil seepage for the control treatment (ΔDO_C). The average ΔDO_{1S} for the EM1, EM2 and EM3 treatments was 5.12 mg L^{-1} , 4.70 mg L^{-1} and 3.48 mg L^{-1} , respectively. In contrast to the low DOC treatments, ΔDO_C for the control treatment (flood irrigation) showed negative values in all the trials. When water with high DOC leaks into the soil, it tends to transfer oxygen to the soil in accordance to the soil oxygen partial pressure in order to balance both oxygen partial pressures. The transfer of oxygen is driven by the presence of an oxygen concentration gradient (Russell and Appleyard, 1915). The same principle applies to the low DOC treatments; since the oxygen partial pressure in the water after passage through the emitters is lower than that in the soil, the soil transfers part of its oxygen to the water, thus increasing its DOC.

Fig. 4 shows the final DO_5 concentration for the control treatment and the low DOC treatments. For the control treatment,

the average DO_5 in the subsurface water sampler was 5.10 mg L^{-1} (64.8% saturation), whereas the average DO_5 in EM1, EM2 and EM3 was 5.31 (65.2% saturation), 4.95 (60.1% saturation) and 3.77 mg L^{-1} (47.2% saturation), respectively. The low DOC treatments provided similar DO_5 concentrations with the exception of the EM3 treatment, which resulted in lower values.

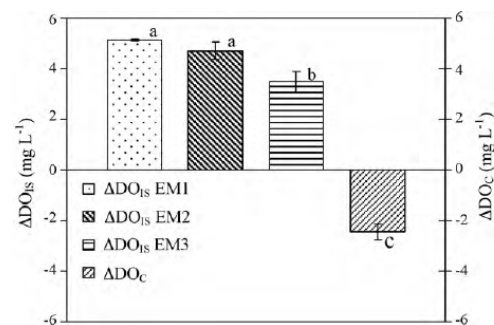


Fig. 3. Dissolved oxygen concentration recovery (ΔDO_{1S}) values for the EM1, EM2, EM3 treatments and ΔDO_C for the control treatment. Vertical bars indicate the standard deviation. Columns with the same letter indicate there are not significant differences between treatments.

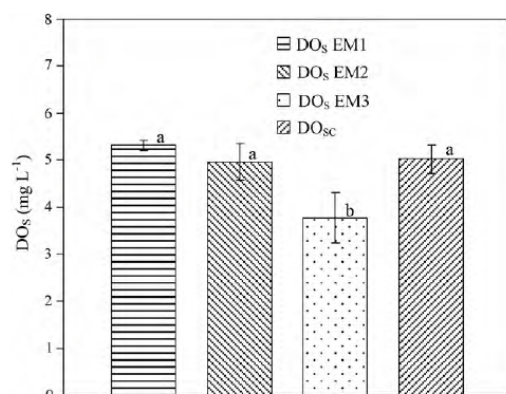


Fig. 4. Dissolved oxygen concentration in the soil (DO_5) for EM1, EM2, and EM3 treatments and for the control treatment. Vertical bars indicate the standard deviation. Columns with same letter indicate there are not significant differences between treatments.

Table 2

Contribution of the oxygen concentration gradient (OCG) and the water temperature increment (WTI) to the increase of dissolved oxygen saturation (DOS) when the water seeped into the soil.

Treatments	Emitters stage			Water samplers stage			Increase of DOS (%)		
	DO _E (mg L ⁻¹)	Temp. (°C)	DOS (%)	DO _S (mg L ⁻¹)	Temp. (°C)	DOS (%)	Effect of WTI	Effect of OCG	Total
EM1	3.34	18.7	35.1	5.31	27.5	65.2	6.2	23.9	30.1
EM2	2.95	18.3	30.1	4.95	27.4	60.1	6.1	23.9	30.0
EM3	1.84	18.5	18.2	3.77	27.3	47.2	3.6	25.4	29.0

Regarding the effect of water temperature in the water oxygenation, in the control treatment water temperature in the Tajo–Segura aqueduct ranged from 24.5°C to 29.3°C (Table 1), very similar to the water temperature measured in the subsurface water sampler (from 27.0°C to 27.9°C). Therefore, the reduction in DOC from 7.54 mg L⁻¹ (92.2% saturation) to 5.10 mg L⁻¹ (64.8% saturation) in the control treatment was attributed to the oxygen concentration gradient, and not a change in water temperature. On the other hand, water temperature in the low DOC treatments at the emitter stage ranged from 17.8°C to 18.6°C and increased on average up to a temperature of 27.4°C when the water seeped into the soil. The contributions of both the oxygen concentration gradient and changes in the water temperature to the increase in the dissolved oxygen saturation point are presented in Table 2. A similar total increase in dissolved oxygen saturation (from 29.0% to 30.1%) was found for EM1, EM2 and EM3 treatments, most of it (from 23.9% to 25.4%) was assigned to the oxygen concentration gradient in the soil, and the rest (from 3.6% to 6.2%) was attributed to the water temperature increment. Note that the effect of oxygen concentration gradient in the soil is higher for EM3 than for EM1, EM2 treatments as result of the lower dissolved oxygen saturation value for EM3 in the emitter stage.

The installation of the venturi air injector in the pipeline supplied a great quantity of extra dissolved oxygen and air bubbles to the water. This slurry of air and water was collected in the precipitate glass, allowing the disappearance of bubbles before the DOC measurement. It took about 30 s. The average DO_{AI} was 7.56 mg L⁻¹ (80.6% saturation), which was very similar to the value registered in the Tajo–Segura aqueduct (7.54 mg L⁻¹; 92.2% saturation) and the values found in uncovered AWRs (Maestre-Valero et al., 2009). Therefore, a venturi air injector brings the DOC up to values typically found in ordinary water distribution channels and uncovered AWRs (close to the saturation point). The combination of venturi air injectors and emitters for surface DIS was not tested in the study to analyse if bubbles vanish during the drop formation and before seeping into the soil.

3.3. Irrigation recommendations

According to the results presented in this study, several recommendations can be provided regarding irrigation with hypoxic water:

- Concerning vegetable crops grown hydroponically, Morard (1995) established the critical oxygen partial pressure at 4–6% of the irrigation nutrient solution (DOC values of approximately 3 mg L⁻¹) under hypoxic conditions, although, that DOC value must be assumed with caution as above described. DOC values registered in DO_P were on average lower than 2 mg L⁻¹. Hydroponics systems lack drip emitters and usually consist of only tanks and pumps. Under these circumstances, there is no chance for water oxygenation and the use of venturi air injectors is highly recommended to increase the DOC in the irrigation nutritious solution.
- For surface drip irrigation, the higher water oxygenation was found in the emitters (ΔDO_2) and during the seepage into the soil

(ΔDO_3). The DOC recovery in ΔDO_2 depended upon the type of emitter. The use of turbulent and intermediate turbulent emitters is recommended over the use of quasi-laminar flow emitters because the former provided final DO_S values similar to furrow irrigation with high DOC (control treatment). Moreover, these final DO_S values were always above the critical DOC thresholds listed in literature. Therefore, the problem of irrigation with hypoxic water can be solved by using adequately designed DIS. Venturi air injector increased the DOC, reaching values similar to those associated with water in open channels and AWRs, but its application to surface DIS with hypoxic water is not advised because this DOC increase would be lost during the seepage into the soil (ΔDO_3).

- For subsurface drip irrigation with hypoxic water, the application of venturi air injectors provides high DOC water and air bubbles close to the root zone of the soil. These air bubbles can replace the oxygen as it is removed from the soil solution, allowing for a high DO_S concentration to be maintained (Bhattarai et al., 2008). Therefore, their application is highly recommended in subsurface DIS, especially if hypoxic water is managed.

4. Conclusions

The present study provides a useful analysis of the effects of typical DIS on the DOC recovery when irrigating with low DOC water, like the resulting from covering farm ponds with shade-cloth covers.

DIS increases irrigation water DOC throughout the system. This increase was observed in all the stages of the system: in water circulation through the pump (ΔDO_1), water passing through the emitters (ΔDO_2) and water seepage into the soil (ΔDO_3). The ΔDO_1 , which was affected by minor air intrusions in the aspiration pipe and pump, had very little relevance. ΔDO_2 was the stage where more oxygenation was reached. The main factor affecting ΔDO_2 was the flow performance type of the emitters. The ΔDO_3 did not show differences between treatments and contributed significantly to the total DOC retrieval in the system. The increase in DOC is primarily ascribed to the oxygen concentration gradient in the soil, with the observed changes in the temperature of subsoil water quite less important.

On the other hand, direct surface irrigation with water from an open channel (with a high DOC, serving as the control treatment) suffered a large reduction in DOC when the water seeped into the soil due to the higher DOC partial pressure in the seeped water compared to the soil water. This DOC reduction was attributed to the oxygen concentration gradient, since no significant differences between water temperatures were found.

References

- Ali, S., Ghosh, N.C., Singh, R., 2008. Evaluating best evaporation estimate model for water surface evaporation in semi-arid region, India. *Hydrol. Process.* 22 (8), 1093–1106.
- Anon., 2003. Bernoulli's Equation, NASA. <http://www.brc.nasa.gov/WWW/K12/airplane/bern.html>.
- Armstrong, W., Drew, M.C., 2002. Root growth and metabolism under oxygen deficiency. In: Waisel, Y., Eshel, A., Kafkafi, U. (Eds.), *Plant Roots. The Hidden Half*. M. Dekker, New York, pp. 729–761.

- Bhattarai, S., Huber, S., Midmore, D.J., 2004. Aerated subsurface irrigation water gives growth and yield benefits to zucchini, vegetable soybean and cotton in heavy clay soil. *Ann. Appl. Biol.* 144, 285–298.
- Bhattarai, S.P., Su, N., Midmore, D.J., 2005. Oxygenation unlock yield potentials of crops in oxygen limited soil environments. *Adv. Agron.* 88, 313–377.
- Bhattarai, S.P., Su, N., Midmore, D.J., Pendergast, L., 2008. Yield, water-use efficiencies and root distribution of soybean, chickpea and pumpkin under different subsurface drip irrigation depths and oxygenation treatments in vertisols. *Irrig. Sci.* 26, 439–450.
- Bonachela, S., Acuña, R.A., Casas, J., 2007. Environmental factors and management practices controlling oxygen dynamics in agricultural irrigation ponds in a semi-arid Mediterranean region: implications for pond agricultural functions. *Water Res.* 41, 1225–1234.
- Bonachela, S., Quesada, J., Acuña, R.A., Magán, J.J., Marfà, O., 2010. Oxyfertilization of a greenhouse tomato crop grown on rockwool slabs and irrigated with treated wastewater: oxygen content dynamics and crop response. *Agr. Water Manage.* 97, 433–438.
- Brainwood, A., Burgin, S., Maheshwari, B., 2004. Temporal variations in water quality of farm dams: impacts of land use and water sources. *Agr. Water Manage.* 70, 151–175.
- Brandt, A., Bresler, E., Diner, N., Ben-Asher, I., Heller, J., Goldberg, D., 1971. Infiltration from a trickle source. I. Mathematical models. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35, 675–682.
- Chérif, M., Tirilly, Y., Bélanger, R.R., 1997. Effect of oxygen concentration on plant growth, lipid peroxidation, and receptivity of tomato roots to pythium under hydroponic conditions. *Eur. J. Plant Pathol.* 103, 255–264.
- Craig, I., Green, A., Scobie, M., Schmidt, E., 2005. Controlling evaporation loss from water storages. NCEA Publication No. 1000580/1, Queensland, p. 207.
- Daigo, K., Phaovattana, V., 1999. Evaporation and percolation control in small farm ponds in Thailand. *J. Jpn. Agric. Res. Q.* 33 (1), 47–56.
- Finn, N., Barnes, S., 2007. The Benefits of Shade-cloth Covers for Potable Water Storages. CSIRO Textile & Fibre Technology, CSIRO Gale Pacific, 42 pp.
- Gallego-Elvira, B., Baille, A., Martín-Górriz, B., Maestre-Valero, J.F., Martínez-Alvarez, V., submitted for publication. Energy balance and evaporation loss of an irrigation reservoir equipped with a suspended cover in a semiarid climate (south-eastern Spain). *Hydrol. Process.*
- Goorahoo, D., Carstensen, G., Zoldoske, D.F., Norum, E., Mazzei, A., 2001. Using air in subsurface drip irrigation (SDI) to increase yields in bell pepper. In: *Proceedings of the Irrigation Association Technical Conference*, San Antonio, Texas, pp. 95–102.
- Hezarjaribi, A., Dehghani, A.A., Meftah Helghi, M., Kiani, A., 2008. Hydraulic performances of various trickle irrigation emitters. *J. Agr.* 7 (3), 265–271.
- Huber, S., 2000. New uses for drip irrigation: partial root zone drying and forced aeration. M.Sc. Thesis, Technische Universität München, Germany, 90 pp.
- Karico, 2000. Technical Report (I): The Survey of Pollution Sources of Water for the Agricultural Use (in Korean). Korean Agricultural and Rural Infrastructure Cooperation, pp. 1–626.
- Keller, J., Karmelli, D., 1975. Trickle Irrigation Design. Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corp, Glendora, Calif.
- Kirnak, H., Doğan, E., Demür, S., Yalçın, S., 2004. Determination of hydraulic performance of trickle irrigation emitters used in irrigation systems in the Harran Plain. *Turk. J. Agric. For.* 28, 223–230.
- Letey, J., Stolzy, L.H., Valoras, N., Szuskiewicz, T.E., 1962. Influence of soil oxygen on growth and mineral concentration of barley. *Agron. J.* 54, 538–540.
- Maestre-Valero, J.F., Martínez-Alvarez, V., Gallego-Elvira, B., 2009. Effects of suspended shade-cloth covers on the water quality of agricultural water reservoirs for irrigation. In: *International Symposium of the Australian Society for Engineering in Agriculture*, Personal communication.
- Marfà, O., Cáceres, R., Guri, S., 2005. Oxyfertilization: a new technique for soilless culture under Mediterranean conditions. *Acta Horti.* 697, 65–72.
- Martínez-Alvarez, V., Baille, A., Molina-Martínez, J.M., González-Real, M.M., 2006. Efficiency of shading materials in reducing evaporation from free water surfaces. *Agr. Water Manage.* 84, 229–239.
- Martínez-Alvarez, V., González-Real, M.M., Baille, A., Maestre-Valero, J.F., Gallego-Elvira, B., 2008. Regional assessment of evaporation from agricultural irrigation reservoirs in a semiarid climate. *Agr. Water Manage.* 29, 1056–1066.
- Martínez-Alvarez, V., Calatrava-Leyva, J., Maestre-Valero, J.F., Martín-Górriz, B., 2009. Economic assessment of shade-cloth covers for agricultural irrigation reservoirs in a semi-arid climate. *Agr. Water Manage.* 96, 1351–1359.
- Morard, P., 1995. Etude de l'oxygénation du système racinaire. In: *SARL (Ed.), Les cultures vegetables hors-sol*. Agen, France, pp. 245–252.
- Raviv, M., Wallach, R., Blom, T.J., 2004. The effect of physical properties of soilless media on plant performance, a review. *Acta Horti.* 644, 251–259.
- Russell, E.J., Appleyard, A., 1915. The atmosphere of the soil: its composition and the causes of variation. *J. Agric. Sci.* 7, 1–48.
- Stolzy, L.H., Letey, J., 1964. Characterizing soil oxygen conditions with a platinum microelectrode. *Adv. Agron.* 16, 249–279.
- Yun-kai, L.I., Pei-ling, Y., Shu-mei, R., 2006. Hydraulic characterizations of tortuous flow in path drip irrigation emitter. *J. Hyd. Ser. B* 18 (4), 449–457.

5.3. Publicación 3

5.3.1. Resumen de la publicación

Título

Comparative analysis of two polyethylene foil materials for dew harvesting in a semi-arid climate.

Introducción y objetivos

La formación de rocío es un fenómeno atmosférico donde la humedad del aire se transforma en agua en estado líquido por medio de un enfriamiento radiativo pasivo (Monteith, 1957; Beysens, 1995; Agam y Berliner, 2006). En condiciones naturales adquiere bastante importancia ya que es usado por plantas y animales en ambientes secos y suministra la humedad necesaria a microorganismos para su supervivencia (Steinberger et al., 1989; Kidron et al., 2002). Además, el uso del rocío podría servir como recurso de agua suplementario para el ser humano cuando otros como la lluvia o el agua subterránea son escasos (Muselli et al., 2006a; Beysens et al., 2007; Sharan et al.; 2007a; Lekouch et al., 2010).

Se han desarrollado una gran variedad de métodos para cuantificar la formación de rocío. Entre ellos destacan los materiales absorbentes (Kidron, 2000), microlisímetros (Jacobs et al., 2002), técnicas micrometeorológicas como el ratio de Bowen o la covarianza de eddy (Vermeulen et al., 1997; Moro et al., 2007) y recolectores específicos de condensación, llamados condensadores radiativos pasivos (CRPs; Beysens et al., 2005). Este último método es probablemente la técnica más prometedora pues permite el uso de diferentes tipos de films y estructuras de soporte (forma, inclinación,...).

Los CRPs consisten en una estructura plana (estándar = 1 m² de superficie) instalada con una inclinación de 30° con respecto al suelo (Beysens et al., 2003). La estructura sustenta un film de polietileno donde se forma la condensación cuando la temperatura del film es menor que la temperatura de rocío y las condiciones ambientales son favorables. Las gotas de agua formadas descienden por gravedad cuando vencen a las fuerzas de cohesión y se transportan mediante una canaleta hacia un depósito donde es cuantificada.

La Organización Internacional para la Utilización de Rocío, (*International Organization for Dew Utilization*; OPUR), ha estandarizado la recolección de condensación estableciendo la metodología, instrumentos y resultados

obtenidos en experimentos de campo. Esta organización, además, recomienda el uso de un material estándar el cual se fabrica con polietileno blanco de baja densidad y está especialmente diseñado mediante la incrustación de esferas de TiO_2 (5%; 0,19 μm de diámetro) y de BaSO_4 (2%; 0,80 μm de diámetro). Este material tiene propiedades hidrofílicas que permiten reducir la barrera a la nucleación en la formación de las gotas de agua sobre la superficie del film al inicio del proceso de condensación. Además tiene una elevada emisividad en la región espectral del infrarrojo medio (7 – 14 μm).

Investigaciones recientes han estudiado la producción de condensación mediante este tipo de estructuras. Muselli et al. (2002) ensayó un condensador radiativo pasivo de 30 m^2 de superficie cerca de Ajaccio (Córcega; Francia) y observó 214 noches de condensación durante un periodo de 478 días, con un valor medio de 0,12 mm por noche de condensación y alcanzando un máximo de 0,38 mm. Estudios posteriores de este mismo investigador en el año 2006 mostraron cantidades similares de condensación (media de 0,13 mm día⁻¹). Otros investigadores han analizado la formación de condensación sobre estructuras conformadas con diferentes tipologías estructurales (Jacobs et al., 2008). Más recientemente, Muselli et al. (2009) y Sharan et al. (2011) indicaron que es necesario aumentar la escala de trabajo mediante la aplicación y adaptación de los films de polietileno en los impluviums existentes en regiones áridas y semiáridas.

Los principales objetivos de este estudio fueron (1) comparar las propiedades y el rendimiento como productores de condensación de un film de polietileno negro de bajo coste con respecto al film estándar propuesto por la OPUR, (2) analizar los factores físicos que afectan la formación de la condensación para profundizar en el entendimiento de los procesos de formación de rocío en regiones semiáridas y (3) valorar el potencial de la recuperación de rocío en una región semiárida del sureste de España, donde este tipo de técnicas podrían ayudar a mitigar el impacto de sequías extremas.

Materiales y métodos

Condensadores radiativos pasivos

La experimentación se ubica en las proximidades de la Estación Experimental de Investigación Agroalimentaria “Tomas Ferro”, de la Universidad Politécnica de

Cartagena (La Palma, Murcia). El área se caracteriza por un clima Mediterráneo semiárido con veranos secos y calurosos e inviernos templados. La temperatura media anual es de 17,5 °C y la precipitación de 350 mm con una elevada variación interanual.

Durante el periodo de experimentación (mayo de 2009 a mayo de 2010), se instalaron dos CRPs siguiendo el procedimiento recomendado por OPUR. Uno de ellos se cubrió con un film de polietileno negro (espesor = 0,15 mm) coloquialmente usado en agricultura para acolchado mientras que el otro CRP se cubrió con un el film estándar de polietileno blanco propuesto por OPUR.

Propiedades ópticas infrarrojas y radiancia emitida por los films

Para determinar la distribución espectral de la absortividad (=emisividad; ε) y la transmisividad de los films en el rango del espectro del infrarrojo medio (2,5 - 25 μm) se utilizó un espectrofotómetro (FT-IR Bruker Vertex 70). Las propiedades de ambos films se analizaron en seco y en mojado.

Para cada longitud de onda (λ) se calculó la radiancia emitida (W) mediante la ley de Planck. Los cálculos se realizaron para una temperatura de 278 K, asumiendo ésta representativa de la temperatura de un film en noches con formación de rocío en una región semiárida como la Cuenca del Segura.

W y ε se integraron para los intervalos del espectro 2,5 – 7, 7 – 14 y 14 – 25 μm . El rango 7 – 14 μm es de especial interés porque se corresponde con la ventana atmosférica y con el rango donde estudios anteriores con el film blanco estándar se ha realizado (e.g. Nilsson et al., 1994). Adicionalmente, los valores de emisividad (ε^*) se ponderaron con la radiancia emitida para cada longitud de onda.

Datos climáticos y de rocío

Durante el periodo de experimentación (Mayo de 2009 a Mayo de 2010) se determinaron en una estación meteorológica localizada cerca de los CRPs las siguientes variables: temperatura del aire (T_a), humedad relativa (HR), velocidad del viento (U_2), radiación atmosférica (L_a) y precipitación (P). Además, se instalaron dos termoradiómetros a 30 cm sobre el film para determinar la temperatura de superficie (T_f). La temperatura de rocío (T_{dew}) se determinó a partir de los registros de T_a y RH . La radiación neta durante la noche (R_n) se calculó a partir de los registros de L_a y de radiación de onda larga emitida por el film ($L_f = \varepsilon^* \sigma T_f^4$) como $R_n = L_a - L_f$.

Para cada CRP, el rocío se recogió entre las 20:00 y las 8:00. El agua pasó a través de una canaleta hacia un contenedor donde se cuantificó mediante dos balanzas de precisión (COBOS;D-300-CBJ; precisión = 0,1 g). La formación de rocío durante la noche se calculó como la diferencia entre el máximo y el mínimo peso de agua registrado durante la noche.

Los registros de formación de rocío se analizaron estadísticamente usando statgraphics Plus v.5.1, el cual ejecuta un análisis de la varianza (ANOVA) para detectar cualquier diferencia significativa entre la producción de rocío de cada CRP.

El test de Tukey, con un nivel de confianza del 95% se calculó para realizar la comparación entre las producciones de rocío.

Resultados y discusión

Análisis espectrométricos y de radiancia

El análisis espectrométrico indicó que la emisividad de ambos materiales fue bastante similar para el rango de espectro considerado (2,5 a 25 μm), con la excepción de la región entre 2,5 a 7 μm donde la emisividad del film blanco fue significativamente menor que la del film negro. Bajo condiciones húmedas, la emisividad fue ligeramente mayor para ambos films, siendo este efecto más marcado para el film blanco.

La notable reducción de la emisividad del film blanco en el rango 2,5 a 7 μm afectó sensiblemente a la irradiancia emitida.

La integración de W en cada rango del espectro suministró información útil para analizar la contribución relativa de cada sub-rango a la emitancia total. En todos los casos, la región 7 – 14 μm supuso el 50% de la radiancia emitida mientras que las regiones más baja y más alta contribuyeron con un 7% y 43% respectivamente. Bajo condiciones secas, W_{tot} fue mayor para el film negro (267,3 W m^{-2}) que para el film blanco (262,0 W m^{-2}). La diferencia de 5 W m^{-2} se observa principalmente en el rango del espectro 2,5 – 7 μm donde la emisividad del film blanco es menor. Bajos condiciones húmedas, W_{tot} fue algo mayor aunque las diferencias entre el film negro y el film blanco fueron menores.

La presencia de agua en el film también incrementó los valores de ε^* , que fueron similares para ambos films en los rangos medio y alto del espectro y presentaron diferencias en el rango 2,5 – 7 μm . Considerando el espectro infrarrojo medio completo

(2,5 – 25 μm), el film negro presentó los valores más altos de ε^* en condiciones secas (0,985 vs 0,971 para film blanco) así como en condiciones húmedas (0,990 vs 0,980 para el film blanco).

Rendimiento de los films

Durante el periodo de experimentación, el número de días de formación de condensación fue de 175 (52%) para el film blanco y de 163 (48%) para el film negro. Los resultados mostraron que la producción de rocío fue dependiente de la estación del año. La producción mensual de rocío más baja se observó en septiembre, para el film blanco (0,57 mm; 6 noches de rocío) y para el film negro (0,69 mm; 4 noches de rocío), mientras que la máxima producción de rocío ocurrió en octubre (3,18 mm y 3,83 mm para el film blanco y el negro respectivamente).

La producción de rocío acumulada durante el periodo de experimentación fue de 17,36 y 20,76 mm para el film blanco y el negro respectivamente. El análisis estadístico de los datos indicó que el film negro fue un 15% más productivo que el film blanco. El mejor funcionamiento del film negro podría atribuirse a su mayor emisividad y radiancia emitida.

El histograma de producción de condensación en clases de 0,05 mm indicó que el mayor número de eventos de rocío de bajo volumen con el film blanco (menos de 0,05 mm) se debió a las propiedades hidrofílicas de su superficie, sin embargo, el film negro fue más eficiente en las clases más altas debido a su mayor emisividad e irradiancia emitida. Las ventajas de ambos films parecen desaparecer para un rango de producción entre 0,05 – 0,10 mm. Estos resultados indican que la producción de rocío se encuentra fuertemente influenciada por la localización del experimento. Si el experimento se hubiese llevado a cabo en una región con producciones de rocío menores a 0,10 mm, probablemente el film blanco hubiese sido más productivo que el film negro.

Correlación con variables meteorológicas

La producción de rocío, Y (mm noche^{-1}) se relacionó con la diferencia de la temperatura del punto de rocío y la temperatura del aire ($\Delta T = T_r - T_a$), equivalente a la humedad relativa, HR . Se propuso la siguiente relación:

5.3. PUBLICACIÓN 3

$$Y_{\text{est}} = a_1 (\Delta T - a_2) \quad (4.5.1)$$

donde a_1 (mm °C) es la sensibilidad de la producción de rocío a ΔT y a_2 es el umbral de ΔT debajo del cual no se observa rocío (Este umbral resultó ser 75%).

No se encontraron diferencias significativas en los parámetros entre ambos films ($a_1 = 0,049 \pm 0,0056$ mm °C⁻¹ y $a_2 = -4,2$ °C $\pm 0,26$ para el film blanco, $a_1 = 0,051 \pm 0,0059$ mm °C⁻¹ y $a_2 = -4,6$ °C $\pm 0,29$ para el film negro).

Los resultados experimentales presentaron una elevada dispersión en el rango completo de ΔT , indicando que ΔT fue un mal indicador de la producción de rocío. Por tanto la ecuación (4.3.1) no puede ser considerada como satisfactoria.

Para refinar el análisis, los residuos de la ecuación (4.5.1) ($r = Y - Y_{\text{est}}$) se calcularon y relacionaron con otras variables climáticas. Los residuos dependieron principalmente de la radiación neta nocturna.

La ecuación (4.5.1) se multiplicó por una función de R_n , $g(R_n)$, para tener en cuenta esta dependencia. Finalmente una función hiperbólica decreciente mostró el mejor ajuste. El modelo empírico propuesto es el siguiente:

$$Y_{\text{est}} = f(\Delta T) g(R_n) = (b_1(\Delta T + b_2)) \left(1 + \frac{b_3}{R_n}\right) \quad (4.5.2)$$

Con $b_1 = 0,126$ y $0,129$, $b_2 = 3,9$ y $4,1$ y $b_3 = 19,21$ y $18,93$ W m⁻² para el film blanco y el negro respectivamente.

Formación potencial de rocío

Cuando $T_r = T_a$, la ecuación (4.5.2) calcula la máxima producción de rocío bajo nuestras condiciones de estudio. Las ecuaciones resultantes para el film blanco y el negro respectivamente son:

$$Y_{\text{max}} = 0.49 \left(1 + \frac{19.21}{R_n}\right) \quad \text{y} \quad Y_{\text{max}} = 0.53 \left(1 + \frac{18.93}{R_n}\right) \quad (4.5.3)$$

De acuerdo a estas dos ecuaciones, no existe formación de rocío para valores de R_n mayores que -20 W m⁻². Monteith (1957) y Sharan et al. (2007c) indicaron que el

máximo enfriamiento radiativo es aproximadamente -100 W m^{-2} . De acuerdo a este máximo enfriamiento radiativo, las máximas producciones de rocío esperadas en este estudio son de 0,40 y 0,43 mm noche⁻¹ para el film blanco y el negro respectivamente.

Conclusión

El uso de CRPs ha demostrado ser eficiente y servir como un recurso complementario de agua, principalmente en regiones en desarrollo, áreas rurales y pequeñas islas, donde el acceso libre al agua y la energía es caro. En estas regiones, estas técnicas son más adecuadas que el uso de destilación, desalinización o explotación subterránea de recursos, ya que todas ellas requieren una importante cantidad de energía y una gran infraestructura para operar.

Nuestros resultados demuestran que la producción de condensación con el film negro, con un coste bastante inferior al film blanco, fue ligeramente superior aunque éste no presente las mismas propiedades hidrofílicas en superficie que el film blanco. La principal desventaja del film negro es el menor número de días de condensación registrados, aunque queda compensado por el aspecto cuantitativo. Las propiedades hidrofílicas del film blanco podrían predominar sobre el poder emisor más alto del film negro en regiones caracterizadas por pequeños eventos de rocío (menores de 0,10 mm noche⁻¹).

Este estudio sugiere que (1) el conocimiento de la emisividad en el rango completo del espectro infrarrojo es necesario para valorar correctamente el rendimiento de un film para la producción de condensación de agua, y (2) asegurar una alta emisividad del film en todo el espectro pareció ser más efectivo para incrementar la producción de rocío que mejorar las propiedades hidrofílicas del material.

En un sentido práctico, el film negro es más apropiado para su uso a una escala mayor pues presentó algunas ventajas sobre el film blanco: mayor producción, menor coste y mayor vida útil.

Los valores anuales de producción de condensación obtenidos (aproximadamente 20 mm) fueron superiores a los obtenidos en previos estudios realizados en zonas costeras mediterráneas localizadas más al norte, tales como Córcega o la costa Croata (Muselli et al., 2002; Beysens et al., 2007; Muselli et al., 2009). Sin embargo fueron inferiores a los valores de rocío observados en regiones áridas como el Negev, Israel (Kidron, 1999).

Las mayores producciones de rocío se observaron después de grandes eventos de lluvia, como consecuencia de la elevada evaporación y del aumento de la humedad relativa nocturna.

La relación empírica propuesta explicó aproximadamente dos tercios de la variancia, y podría ser usada para realizar estimaciones de formación de rocío con una precisión razonable. En este estudio, la máxima producción de rocío condicionada a un enfriamiento radiativo máximo de -100 W m^{-2} fue de $0,40 \text{ mm noche}^{-1}$.

Finalmente, se debe hacer hincapié en que la radiación neta se requiere para predecir la formación de rocío con una precisión adecuada. Esto implica que la determinación de la temperatura de la superficie del film debe ser medida o estimada por medio de un modelo que describa el balance de energía en la superficie del cuerpo (Finch et al., 2002). Estos modelos serían útiles para (1) valorar los rendimientos de los CRPs en diferentes localizaciones y climas y (2) para el diseño de estructuras, formas y orientaciones de los CRPs correctas. Además, estos modelos permitirían relacionar la formación de rocío sobre un CRP, sobre una cobertura de sombreo suspendida o sobre una superficie de agua mediante comparación de temperaturas de superficie.

5.3.2. Copia de la publicación

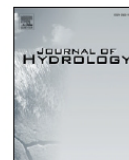
Journal of Hydrology 410 (2011) 84–91



Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Journal of Hydrology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jhydrol



Comparative analysis of two polyethylene foil materials for dew harvesting in a semi-arid climate

J.F. Maestre-Valero*, V. Martínez-Alvarez, A. Baille, B. Martín-Górriz, B. Gallego-Elvira

Universidad Politécnica de Cartagena, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Paseo Alfonso XIII 48, 30203 Cartagena, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 5 April 2011

Received in revised form 23 August 2011

Accepted 10 September 2011

Available online 19 September 2011

This manuscript was handled by Konstantine P. Georgakakos, Editor-in-Chief, with the assistance of Efrat Morin, Associate Editor

Keywords:

Water condensers

Water harvesting

Dew collection

Infra-red emissivity

Dew applications

SUMMARY

This paper analyses the dew collection performance of two polyethylene (PE) foils in a semi-arid region (Southern Spain). The dew collecting devices consisted of two commercial passive radiative dew condensers (RDCs) of 1 m² tilted to 30°. They were fitted with two different high-emissivity PE foils: a white hydrophilic foil (WSF) recommended as standard for dew recovery comparisons by the International Organization for Dew Utilization (OPUR), and a low-cost black PE foil (BF) widely used for mulching in horticulture. Dew yield, foil surface temperature and meteorological variables (air temperature, relative humidity, downward long wave radiation and wind speed) were recorded hourly during a 1-year period from May-2009 to May-2010. The spectral emissivity of the foils was determined in laboratory in the range 2.5–25 µm and the radiance-weighted values were calculated over different intervals, indicating that BF emitted more than WSF, especially in the range 2.5–7 µm. Dew yield was well correlated with the air relative humidity and foil net radiation in both foils and was hardly detected when the relative humidity was lower than 75% or the wind speed higher than 1.5 m s⁻¹. WSF was more sensitive to dew formation due to its hydrophilic properties, registering more dewy nights (175) than BF (163) while the annual cumulative dew yield for BF was higher (20.76 mm) than for WSF (17.36 mm) due to the higher emissivity and emitted radiance of BF. These results suggested that increasing the surface emissivity over the whole IR spectrum could be more effective for improving RDC yield performances than increasing the surface hydrophilic properties. On a practical point of view, BF could be considered as a suitable material for large scale RDCs, as in our study it presented several advantages over the reference material, such as higher dew collection performance, longer lifespan and much lower cost.

© 2011 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Dew is atmospheric humidity that is transformed into liquid water by passive radiative cooling (Monteith, 1957; Beysens, 1995; Agam and Berliner, 2006). Under natural conditions, this potential water source can be widely used by plants and animals in dry environments and can supply enough moisture to microorganisms for survival (Steinberger et al., 1989; Kidron et al., 2002). Dew collection by means of manufactured structures could serve as a welcome supplementary source of water when other sources, such as rain and groundwater are very scarce. Besides, dew could be used as potable water for human consumption in regions where the water accessibility and supply becomes difficult (Muselli et al., 2006a; Lekouch et al., 2011), such as semi-arid and arid geographical settings and small islands in developing countries (Beysens et al., 2007; Sharan, 2007a).

The essential role of dew as a water source in arid environments, ecosystems and agrosystems largely explains the increasing interest among scientists and engineers in studying the dew

formation phenomenon. The presence/absence of dew can be readily detected by means of wetness sensors (Richards, 2009). The quantification of dew yield on different types of surface can be carried out by means of a wide range of methods, such as absorbent material or cloth plates (Kidron, 2000), microlysimeters (Jacobs et al., 2002), micrometeorological techniques such as the Bowen ratio energy balance or the eddy-covariance technique (Vermeulen et al., 1997; Moro et al., 2007), and dew-specific collectors, called passive 'radiative dew condensers' (RDCs, Beysens et al., 2005).

Among all these methods, RDCs are likely the most suitable techniques to be used at engineering applications, as they allow to assess the performance of different types of foils and supporting structures (shape, tilt, etc.). The International Organization for Dew Utilization (OPUR; <http://www.opur.fr/>) has widely standardized the characterization of dew collection by establishing the methodology, instrumentation and data obtained from in-field experimental test studies. This organization recommends the use of a standard material which is made of a special white low-density polyethylene (PE) foil, with 5% volume of TiO₂ microspheres (diameter 0.19 µm) and 2% volume of BaSO₄ microspheres (diameter 0.8 µm) embedded in it. This material provides hydrophilic

* Corresponding author. Tel.: +34 968 32 70 52; fax: +34 968 32 54 33.

E-mail address: josef.maestre@upct.es (J.F. Maestre-Valero).

properties that low the nucleation barrier at the onset of the condensation process together with a high emissivity in the near infrared (7–14 μm); two important features that favor dew formation. More information on this material can be found in Nilsson (1994). From here on, this specially designed white foil is named WSF (White Standard Foil).

Several recent investigations aimed to assess the potential for dew harvesting using the standard foil have been reported. Muselli et al. (2002) tested a 30 m² RDC near Ajaccio (Corsica, France), measuring 214 dewy nights over an observation period of 478 days, with an average of 0.12 mm per dewy night and a maximum daily yield of 0.38 mm. In a posterior study at the same site (Muselli et al., 2006a), similar dew yield were obtained (average of 0.13 mm per dewy day). Jacobs et al. (2008) compared two types of RDCs fitted with WSF, one being a 1 m² insulated planar dew condenser set at a 30° angle from horizontal, and the other presenting an inverted-pyramid shape. Recently, Muselli et al. (2009) studied the dew yield at the Dalmatian Coast with two 1 m² RDCs fitted with WSF, concluding that it could be worthwhile to rehabilitate the numerous deserted rain collectors (impluviums) existing in the region for the objective of dew harvesting.

The standard WSF is currently rather expensive (8 \$ m⁻²) since it is generally manufactured for research purposes. A trend to use low-cost collector foils with similar performances would be feasible for large scale dew recovery systems, where water can be harvested for domestic and rural activities at the individual farm or village scale. Some rural development projects, especially in India (Sharan, 2007a), tried to promote rain and dew recollection over large areas, by covering the soil of gentle-slop terrain with PE foils. In such large scale systems, the covering material should be of low cost, resistant to weathering, tensile and friction forces, and easily available to farmers of developing countries. A suitable choice might be the installation of black PE foils that are widely used in agriculture as soil mulching for weed control, as such films respond to the above criteria. However, the potential for dew recovery of such films is not known, and need to be assessed before recommending them for dew harvesting.

The main objectives of this study were (1) to compare the properties and dew recovery performances of a low-cost black PE foil with respect to the standard white PE foil, (2) to analyze the physical factors driving dew formation to contribute to a better knowledge of the dew formation process in semi-arid regions and (3) to assess the potential of dew recovery in a semi-arid region of South Spain, where techniques of dew harvesting could help in mitigating the impact of extreme drought events.

2. Materials and methods

2.1. Site and dew water condensers

The experimental site is located at the Agricultural Experimental Station of the Technical University of Cartagena, south-eastern Spain (37°41'20"N, 0°57'03"W). This area is characterized by a Mediterranean semi-arid climate with warm, dry summers and mild winters. Average annual temperature is 17.5 °C, reaching maximum temperatures of 38 °C in summer and minimum temperatures of 0 °C in winter. Annual rainfall averages 320 mm, with high seasonal and inter-annual variability. Most precipitation occurs during the fall and winter months, but inter-annual droughts are also common. Average reference evapotranspiration, calculated by the Penman–Monteith method (Allen et al., 1998), is about 1250 mm year⁻¹.

Two RDCs were set up following the OPUR international standard procedure (Fig. 1). They consisted of 1 m² insulated flat pans tilted 30° to horizontal to ensure a good compromise between



Fig. 1. View of the two radiative dew condensers with the black PE foil (BF) and the white standard foil (WSF) fitted to the 30° tilted flat pans.

radiative energy loss and water recovery by gravity (Beysens et al., 2003). The water condensing on the surface at night was collected under gravity flow by a gutter and run to a container where it was stored and weighed. Both containers were provided with a siphon system for auto-emptying when full. One of the RDCs was dressed with the white standard foil (WSF), previously described, whereas the other was fitted with a 0.15 mm thick black low-density PE foil (in the following, BF), typically used as soil mulching in agriculture. This is a low-cost PE foil (0.8 \$ m⁻²) which is made of 97.5% of low density PE, 2.5% of black of carbon and contains some antioxidant and thermal stabilizer additives.

2.2. IR optical properties and emitted radiance of the foils

A spectrophotometer (FT-IR Bruker Vertex 70) was used for determining the spectral distribution (every 10 nm) of the absorptivity (=emissivity) and transmissivity of the foils for the mid IR spectrum (2.5–25 μm), under wet and dry conditions. Wet conditions were obtained by spraying water during five minutes on the foil samples. An average spectral curve, representing the mean of five repetitions, was calculated for each foil and surface status.

For a given wavelength λ , the emitted radiance (W , energy lost by radiation to the sky) was deduced from the Planck's law:

$$W = \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T_f}\right) - 1} \varepsilon \quad (1)$$

where $C_1 = 3.74 \times 10^8$ and $C_2 = 1.44 \times 10^4$ are constants, λ is the wavelength, ε is the measured emissivity of each foil configuration in each 10 nm wavelength interval and T_f (K) is the surface temperature. The calculations of W were performed with $T_f = 278$ K, which could be considered as a representative value of the foil temperature for dewy nights in the study area.

W and ε values were integrated over the following wavelength intervals: 2.5–7 μm , 7–14 μm and 14–25 μm . The range 7–14 μm was of special interest as it corresponds to the atmospheric window, the range considered in previous studies with the standard foil (e.g. Nilsson, 1994). The values of the emissivity weighed by the emitted radiance for both foils and under dry and wet conditions were calculated (Eq. (2)) for all spectrum ranges as:

$$\varepsilon^* = \frac{\sum \varepsilon_i W_i}{\sum W_i} \quad (2)$$

where ε_i and W_i are the emissivity and the emitted radiance, respectively, at wavelength λ_i .

2.3. Climate and dew measurements

During the observation period (May-2009 to May-2010) an automated meteorological station located at the vicinity of the RDCs provided the meteorological data required for the study. The following variables were continuously recorded at 2 m above ground: air temperature (T_a) and relative humidity (RH) (Vaisala HMP45C probe), wind speed (U_2) (Vector Instruments A100R anemometer) and downward atmospheric radiation (L_d) (Kipp & Zonen CGR 3 pyrgeometer). Rainfall (P) was measured by means of a tipping bucket gauge (Young 52203). Additional data of air temperature, relative humidity and wind speed were also collected close to the foils. Two infrared radiometers (Campbell Scientific SI – 111) located 30 cm over the foil supplied the foil surface temperature, T_f . Dew point (T_{dew}) was calculated from T_a and RH. The net radiation (R_n) during the night was calculated as $R_n = L_d - L_f$ with $L_f = \varepsilon^* \sigma T_f^4$, ε^* being the radiance weighed emissivity of the foil (see Section 3).

For each RDC, dew was collected at night from 20:00 to 8:00. The dew ran along an inclined gutter and passed through a plastic pipe into the container where dew was weighed by means of two high precision balances (COBOS, D-3000-CBJ; precision = 0.1 g). A wiper was used daily at dawn to scrape the extra water that remained on the foils. This quantity was added to the amount recovered in the collecting tanks to give the potential dew recovery. Previous analyses of dew collection on the foils indicated the scraped fraction represented about 15% and 20% of the total yield for the WSF and the BF respectively, a slightly lower value than the one reported by Muselli et al. (2002). In the following, the analysis concerns the potential dew recovery, which represents better the intensity of the condensation process. No damage due to scraping was noted on the foils during the measurements period. Eventually, dew yield was calculated as the difference between the maximum and the minimum weight of water recorded during the night.

Dew yield data were statistically analyzed by means of the statistical software package Statgraphics Plus (v.5.1), which performs analysis via a variance technique (ANOVA) to detect any significant differences between the dew yield of both WSF and BF. Tukey's range test at a 95% confidence level was calculated for comparison between dew yield data. Data from days corresponding to rainfall events at night were discarded from the data analysis because of the imprecision in measuring dew amount.

All sensors above described were scanned at 10-s interval and averaged hourly whereas the two precision balances were scanned at hourly interval. All data were recorded by a datalogger (CR1000 Campbell). The sensors and balances were periodically calibrated.

3. Results and discussion

3.1. Spectrometry and radiance analysis

Fig. 2 presents the spectral distribution of the foil emissivity in the range 2.5–25 μm for WSF (Fig. 2a) and BF (Fig. 2b), under dry and wet conditions. The curves were quite similar over the considered spectrum, with the exception of the region from 2.5 to 7 μm , where the emissivity of WSF was significantly lower than that of BF.

The emissivity under wet conditions was slightly higher than in dry conditions for both foils. The averaged emissivity of WSF increased 1.93% and 0.72% in the 2.5–25 μm range and the 7–14 μm range, respectively. The corresponding increases for BF were 0.26% and 0.60%. This result indicates that dew formation raised slightly the surface emissivity, the effect being more marked for WSF.

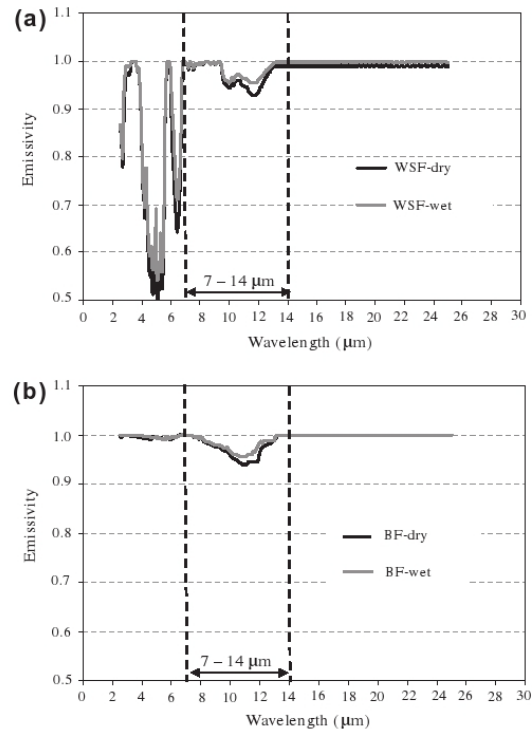


Fig. 2. Distribution of the foil emissivity (ε) for (a) WSF and (b) BF, under dry and wet conditions in the 2.5–25 μm range. Vertical bars delimit the 7–14 μm region (atmospheric window).

Whereas ε of both foils was found to be very similar in the range 7–14 μm , there were significant differences in the lower wavelength interval (2.5–7 μm) that affected to some extent the emitted radiance, W (Fig. 3a and b).

Integrating W over the three sub-ranges supplied useful information on the relative contribution of each sub-range to the total emitted radiance (W_{tot}) in the 2.5–25 μm range for the two foils under dry and wet conditions (Table 1). In all cases, the 7–14 μm region accounts approximately for 50% of W_{tot} , whereas the lower region and the upper region contributed to 7% and 43%, respectively. Under dry conditions, W_{tot} was higher for BF (267.3 W m^{-2}) than for WSF (262.0 W m^{-2}), that is a difference of 5.3 W m^{-2} which has to be ascribed mainly to the difference of W in the lower sub-range (19.4 vs 15.4 W m^{-2}). The trend was similar under wet conditions, but the differences were somewhat smaller: $W_{\text{tot}} = 268.5$ and 265 W m^{-2} for BF and WSF respectively, a difference of 3.5 W m^{-2} which was mainly due to the difference observed in the lower sub-range (19.4 vs 16.1 W m^{-2}), as for the dry foils. The presence of water on the foil surfaces slightly increased W in all sub-ranges, the increase being greater for WSF (+5 W m^{-2}) than for BF (+1.2 W m^{-2}).

Water also increased the values of ε^* , the emissivity weighed by the emitted radiance for both foils (Table 1). Among foils, the values of ε^* were very similar for the middle and upper sub-ranges, but presented differences in the lower sub-range. Under dry conditions, ε^* in the 2.5–7 μm interval was equal to 0.825 and 0.995 for WSF and BF respectively. Under wet conditions, the difference was somewhat smaller (0.850 and 0.996 respectively). Considering the whole spectrum range, BF presented the highest values of ε^* under dry (0.985 vs 0.971 for WSF) as well as wet (0.990 vs 0.980 for

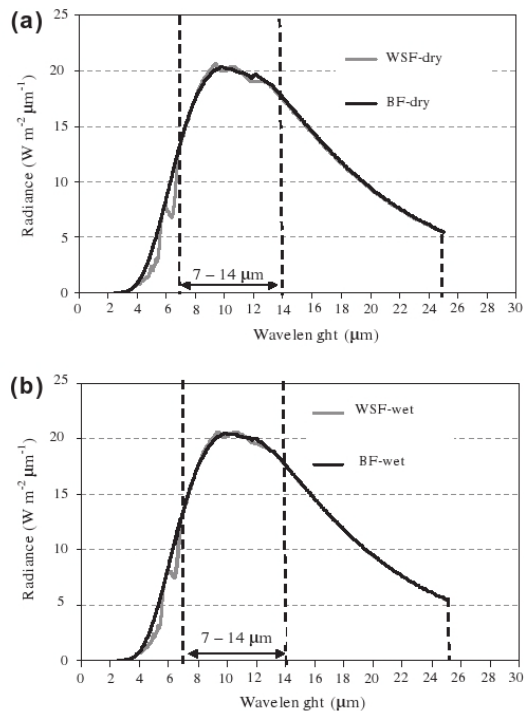


Fig. 3. Distribution of emitted radiance ($W\ m^{-2}\ \mu m^{-1}$) in the 2.5–25 μm range according to the Planck's law assuming a surface temperature of 278 K for (a) WSF and (b) BF under dry and wet conditions. Vertical bars delimit the 7–14 μm region (atmospheric window).

WSF) conditions. Therefore, it could be recommended to use the radiance-weighted emissivity ε^* for the calculation and simulation of the emitted radiance from dew collecting surfaces.

Summarizing, both foils presented similar values of W , ε and ε^* for $\lambda > 7\ \mu m$, but with significant differences in the range 2.5–7 μm . Accordingly, it can be concluded that BF presents a higher emissive power than WSF, due to the higher emissivity of BF in the range 2.5–7 μm , although the lower emissivity of the WSF in the lower spectral range allow to reflect sunlight and also acquire a role of passive air conditioning if it is applied on roofs. Besides, the higher reflectance of WSF in the short-wave (solar spectrum)

provides lower surface temperature during the day than BF, resulting in WSF reaching more rapidly the dew-point temperature than BF (Sharan et al., 2007b).

3.2. Foils performance

During the 1-year experimental period, the number of dewy nights amounted to 175 and 163 for WSF and BF respectively (Table 2). Accounting for the lack of data due to sensor failure for 27 days of the observation period, the frequency of dew was 52% and 48% for WSF and BF respectively. Rainfall events (50 days) were unevenly distributed throughout the experimental period, amounting to a total of 490 mm.

Our results showed that dew yield was season-dependent. Three periods differing markedly in dew yield could be distinguished. The first one ranged from May-09 to July-09, the second one covered the summer months and the third corresponded to the period October-09 to May-10 (Table 2). The lowest monthly dew yield was observed in September, for both WSF (0.57 mm, 6 dewy nights) and BF (0.69 mm, 4 dewy nights), whereas the highest yield occurred in October (values of 3.18 mm and 3.83 mm for WSF and BF, respectively). The latter could be attributed to (i) strong radiative cooling at night due to the prevalence of clear sky conditions (only 2 rainfall events in October against 10 in September), (ii) high atmospheric humidity resulting from the high soil evaporation rate after heavy rainfalls (276 mm) on late September (Fig. 4) and (iii) low wind speed during the night. These conditions resulted in that the difference between dew-point and foil temperature reached its highest values in October.

Cumulated dew yield over the observation period was 17.36 and 20.76 mm for WSF and BF, respectively (Fig. 4). The results from the statistical analysis indicated that significant differences on dew yield were found between both foils, being the BF approximately 15% more efficient in recovering dew than WSF. The better performance of BF could be ascribed to its higher emissivity and emitted radiance (Table 1). This finding was confirmed with the nightly value of minimum foil temperature, which was on average 0.43 °C lower for BF than for WSF.

The dew yield histogram by classes of 0.05 mm (Fig. 5) suggested that the higher number of dewy events with low yield (less than 0.05 mm) for WSF were due to its hydrophilic surface properties. This characteristic allowed WSF to recover water from small events of dew (less than 0.10 mm) whereas the BF was less effective in this aspect. Conversely, BF was more efficient in the upper classes due to its higher emissivity. These respective advantages of WSF and BF appear to be of the same magnitude in the dew yield range 0.05–0.10 mm, where dew yield frequency for the two foils was identical (Fig. 5). These results make clear the influence of

Table 1

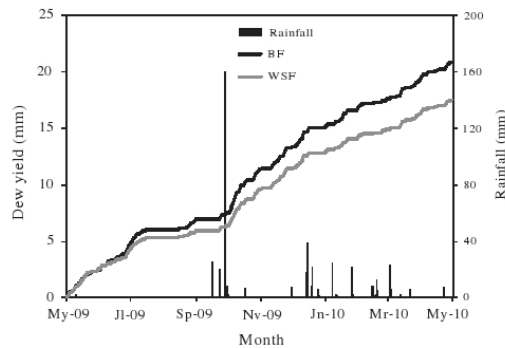
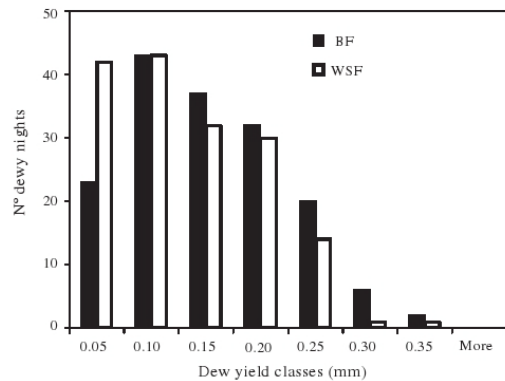
Integrated values of emitted radiance ($W\ m^{-2}$), emissivity (ε) and radiance-weighted emissivity (ε^*) in the 2.5–7 μm , 7–14 μm , 14–25 μm and the entire mid-infrared (MIR) ranges under dry and wet conditions.

Foil	Condition	Parameters	2.5–7 μm	7–14 μm	14–25 μm	Total MIR
WSF	Dry	ε	0.833	0.976	0.990	0.876
		ε^*	0.825	0.971	0.990	0.971
		W	15.4	131.3	115.3	262.0
	Wet	ε	0.854	0.983	0.998	0.893
		ε^*	0.850	0.980	0.998	0.980
		W	16.1	132.6	116.3	265.0
BF	Dry	ε	0.996	0.976	0.998	0.992
		ε^*	0.995	0.972	0.998	0.985
		W	19.5	131.5	116.3	267.3
	Wet	ε	0.998	0.982	0.999	0.995
		ε^*	0.996	0.980	0.999	0.990
		W	19.5	132.5	116.5	268.5

Table 2

Number of dewy, rainfall and sensor failure nights and total monthly dew yield for the WSF and BF condensers during the observation period.

Year	Month	Number of days				Total dew yield (mm)	
		Dew on WSF	Dew on BF	Rainfall events	Sensor failure	WSF	BF
2009	May	22	22	3	0	2.47	2.43
	June	20	19	0	0	1.79	2.29
	July ^a	15	15	0	15	1.06	1.29
	August ^a	10	10	0	12	0.51	0.77
	September	6	4	10	0	0.57	0.69
	October	20	19	2	0	3.18	3.83
	November	17	15	2	0	1.84	1.99
	December	13	11	7	0	1.39	1.71
2010	January	13	11	7	0	1.12	1.53
	February	10	9	9	0	0.87	0.99
	March	15	15	7	0	1.30	1.62
	April	14	13	3	0	1.26	1.62
Annual		175	163	50	27	17.36	20.76

^a Months affected by the sensor failure.**Fig. 4.** Cumulated dew yield of WSF and BF condensers during the observation period. Bars represent rainfall events (mm).**Fig. 5.** Dew yield frequency histogram of WSF (white bars) and BF (black bars) during the observation period.

the dew yield potential in the experimental location on the comparison of yield performance between both foils, i.e. if the experiment had been carried out in another region characterized by smaller dew yield events (less than 0.10 mm), the hydrophilic properties of the WSF had probably allowed the WSF to collect more water than the BF. However, under the south-eastern Spain

semi-arid conditions the BF has clearly better yield performance than the WSF.

In our study, the maximum dew yield recorded during a dewy night was 0.314 mm in December-09 for WSF and 0.316 mm in October-09 for BF. These values corresponded to the period from October-09 to December-09 when clear sky, low wind speed, and high values of atmospheric humidity were prevailing. Conversely, the lowest dew yield values for both foils were found during the driest months, i.e. July and August 2009 (Table 3). On annual scale, mean values were 0.105 mm d⁻¹ and 0.128 mm d⁻¹ for WSF and BF, respectively (Table 3).

3.3. Correlation with meteorological variables

The observed night dew yield, Y (mm night⁻¹), was first related to the dew point-to-air difference $\Delta T = T_{\text{dew}} - T_a$ (Fig. 6), that is, with the relative humidity, RH . The experimental data were fit to the following linear relationship to get an estimate of Y , Y_{est} , from the knowledge of ΔT .

$$Y_{\text{est}} = a_1(\Delta T - a_2) \quad (3)$$

where a_1 (in mm °C⁻¹) is the dew yield sensitivity to ΔT and a_2 the threshold value of ΔT below which condensation was not observed (Note that the threshold value of RH would be ~75%, Fig. 6). There were no significant differences in the parameter values between the two foils ($a_1 = 0.049 \pm 0.0056$ mm °C⁻¹ and $a_2 = -4.2$ °C ± 0.26 for WSF, $a_1 = 0.051 \pm 0.0059$ mm °C⁻¹ and $a_2 = -4.6$ °C ± 0.29 for BF). The dew yield sensitivity was in between the values found by Muselli et al. (2006b) and Muselli et al. (2009). Overall, the predictive performance of Eq. (3), characterized by standard statistical parameters (see Table 4) could not be considered as satisfactory. The experimental data presented considerable scatter over the whole range of ΔT , indicating that ΔT alone was a poor descriptor of dew yield.

To refine the correlation analysis, the residuals of Eq. (3) ($r = Y - Y_{\text{est}}$) were calculated and related to other climatic variables, revealing that the residuals were mainly dependent on the nightly net radiation, for both WSF and BF (Fig. 7).

Subsequently, Eq. (3) was multiplied by a function of R_n , $g(R_n)$, to account for this dependence. After testing various types of function, a decreasing hyperbolic function was found to supply the best fit (lowest root mean square error between observed and estimated values). The proposed empirical model to predict Y from T_a , T_{dew} and R_n was:

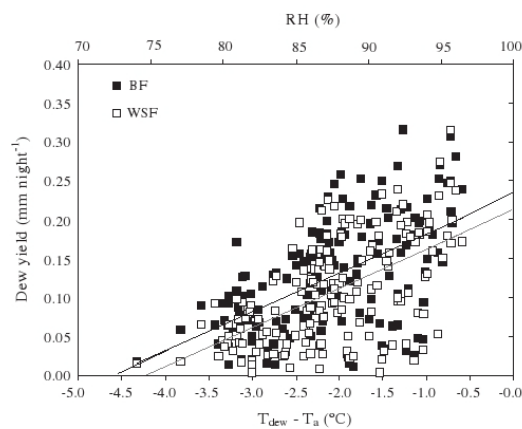
$$Y_{\text{est}} = f(\Delta T)g(R_n) = (b_1(\Delta T + b_2)) \left(1 + \frac{b_3}{R_n}\right) \quad (4)$$

Table 3

Monthly and annual maximum, average, and standard deviation of dew yield for the WSF and BF condensers during the observation period.

Month		Dew on WSF			Dew on BF		
		Maximum	Average	Std. Dev.	Maximum	Average	Std. Dev.
2009	May	0.210	0.112	0.060	0.201	0.110	0.051
	June	0.226	0.094	0.070	0.246	0.120	0.062
	July	0.163	0.070	0.042	0.155	0.086	0.049
	August	0.119	0.050	0.031	0.141	0.077	0.028
	September	0.161	0.143	0.020	0.198	0.174	0.022
	October	0.237	0.167	0.051	0.316	0.201	0.061
	November	0.274	0.123	0.081	0.270	0.133	0.079
	December	0.314	0.127	0.089	0.307	0.155	0.091
2010	January	0.172	0.107	0.051	0.238	0.139	0.070
	February	0.213	0.096	0.070	0.215	0.111	0.058
	March	0.205	0.086	0.066	0.231	0.108	0.069
	April	0.233	0.092	0.059	0.250	0.124	0.072
Annual		0.314	0.105	0.031	0.316	0.128	0.035

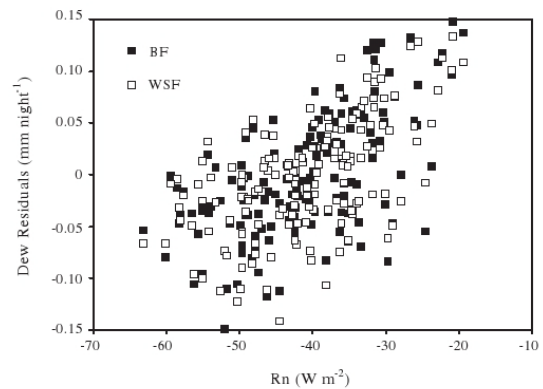
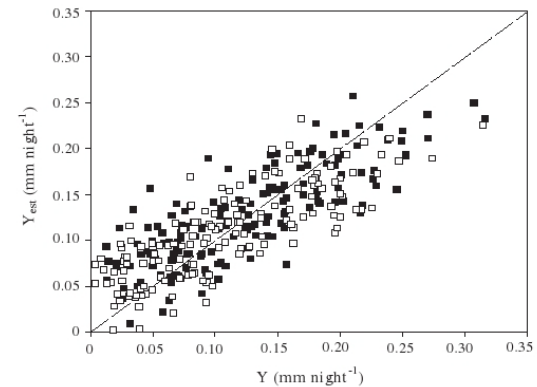
Std. Dev.: Standard deviation.

**Fig. 6.** Correlation of dew yield Y (mm night^{-1}) with $\Delta T = T_{\text{dew}} - T_a$ ($^{\circ}\text{C}$, lower scale) and relative humidity RH (%), upper scale) for WSF (white symbols) and BF (black symbols).**Table 4**

Values of (i) fitted parameters and (ii) statistical parameters characterizing the predictive performance for Eqs. (3) and (4).

	WSF	BF
(i) Eq. (3): $Y_{\text{est}} = a_1((T_d - T_a) + a_2)$		
a_1 ($\text{mm night}^{-1} ^{\circ}\text{C}^{-1}$)	0.049 ± 0.005	0.051 ± 0.006
a_2 ($^{\circ}\text{C}$)	-4.2 ± 0.260	-4.6 ± 0.297
R^2	0.33	0.32
RMSE (mm night^{-1})	0.043	0.045
MBE (mm night^{-1})	0.003	0.003
(ii) Eq. (4): $Y_{\text{est}} = b_1((T_d - T_a) + b_2)(1 + b_3/R_n)$		
b_1 ($\text{mm night}^{-1} ^{\circ}\text{C}^{-1}$)	0.126 ± 0.011	0.129 ± 0.011
b_2 ($^{\circ}\text{C}$)	3.9 ± 0.128	4.1 ± 0.137
b_3 (W m^{-2})	19.21 ± 0.94	18.93 ± 0.88
R^2	0.63	0.65
RMSE (mm night^{-1})	0.035	0.035
MBE (mm night^{-1})	0.002	0.002

with $b_1 = 0.126$ and 0.129 , $b_2 = 3.9$ and 4.1 and $b_3 = 19.21$ and 18.93 W m^{-2} respectively for WSF and BF. The addition of R_n as supplementary predictive variable improved considerably the predictive performance with respect to Eq. (3) (Fig. 8; Table 4).

**Fig. 7.** Relationship between the residuals (r) of Eq. (3) and the mean nightly net radiation (R_n) for WSF (white symbols) and BF (black symbols).**Fig. 8.** Comparison between observed (Y) and estimated (Y_{est}) night dew yield, using Eq. (4) (WSF: white symbols, BF: black symbols). The dashed line is the 1:1 relationship.

Using wind speed at 2 m (U_2) as additional variable to ΔT and R_n improved only marginally the predictive performance (results not shown). The distribution of dew yield vs wind speed (Fig. 9)

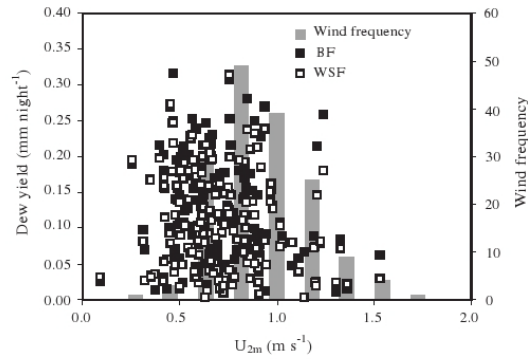


Fig. 9. Correlation of dew yield with wind speed U_{2m} and wind speed frequency classes for WSF (white symbols) and BF (black symbols). Wind frequency has been only plotted for the range where dew formation occurs ($0\text{--}2\text{ m s}^{-1}$).

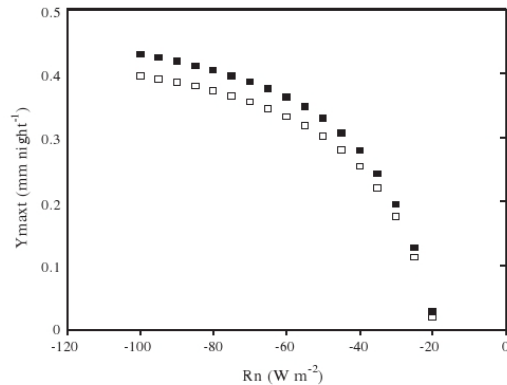


Fig. 10. Maximum dew yield as a function of foil net radiation as predicted from Eq. (5) for WSF (white symbols) and BF (black symbols).

indicated that most of the events of dew occurred when U_2 was lower than 1 m s^{-1} .

3.4. Potential dew yield

If $T_{\text{dew}} = T_a$, Eq. (4) theoretically provides the maximum attainable yield Y_{max} under our study conditions (Fig. 10):

$$Y_{\text{max}} = 0.49 \left(1 + \frac{19.21}{R_n} \right) \quad \text{and} \quad Y_{\text{max}} = 0.53 \left(1 + \frac{18.93}{R_n} \right) \quad (5)$$

respectively for WSF and BF. As it could be deduced from the values of b_3 (19.21 for WSF and 18.93 for BF), no condensation would occur for nightly mean values of R_n higher than -20 W m^{-2} . The curves indicated a fast increase in dew recovery potential in the range -20 to -40 W m^{-2} . For $R_n = -100\text{ W m}^{-2}$, value that could be considered as the maximum radiative cooling power for a condenser (Monteith, 1957; Sharan et al., 2007c), the maximum potential yield would be 0.40 and $0.43\text{ mm night}^{-1}$ for WSF and BF respectively, confirming the slightly higher potential for dew recovery observed with BF.

4. Conclusion

RDCs have been demonstrated to serve as a complementary source of drinking water, mainly in developing countries, rural

areas or small islands, where free-access to water and energy is expensive. In these regions they are ahead of other techniques such as distillation or desalination, or deep underground water extraction, all of which require a large amount of energy and a massive infrastructure to operate.

Our study under south-eastern Spain semi-arid conditions demonstrated that the potential for dew yield of a low-cost black PE foil (BF) was slightly higher than that of the OPUR-standard foil (WSF), although the BF does not present the hydrophilic properties of the latter. This disadvantage of BF resulted in less dewy days observed, but was more than compensated on the quantitative aspect – i.e. the amount of annual recollected water – by the higher emissivity and radiative cooling power of BF in the lower range ($2.5\text{--}7\text{ }\mu\text{m}$) of the mid IR spectrum. It should be pointed out that the hydrophilic properties of WSF might predominate over the higher emissive power of BF in regions characterized by small dew yield events.

Our results suggested that (i) the knowledge of the emissivity in the whole IR spectrum is necessary to correctly assess the performance of the foil and (ii) ensuring a high emissivity over the whole IR spectrum appeared more effective for increasing RDC yield than improving surface hydrophilic properties. On a practical point of view, BF could be considered as a suitable material for large-scale RDCs, as in our study, it presented several advantages over the standard reference foil, i.e. higher dew collection performance, longer lifespan and much lower cost. Dealing with the last two aspects, it must be pointed out that if the WSF were manufactured in large quantities and anti-UV treated, its cost might be reduced and its lifespan extended.

With respect to yield performances, we showed that RDCs installed in semi-arid coastal sites similar to our study site (Southern Spain) could recollect approximately 20 mm per year. This value was somewhat higher than those observed in previous studies in other Mediterranean coastal zones situated more at North, such as Corsica or the Croatian Coast (Muselli et al., 2002, 2009; Beysens et al., 2007), but lower than those reported for arid countries such as the Negev, Israel (Kidron, 1999). It should be stressed that the highest values of daily dew yield were observed mainly during periods following heavy rainfalls, due to high soil evaporation and high nocturnal atmospheric humidity. Therefore, it is likely that the amount of recollected dew would depend in part on the importance, frequency and time occurrence of rainfall events that affect the humidity content of the air at the vicinity of the condenser. This was confirmed by our correlation analysis between nightly yield and atmospheric variables, where the predominant predictive variables were found to be the relative humidity and the net radiation of the foil.

An empirical relationship between yield and the two mentioned predictive variables was proposed that explained about two-thirds of the total variance, and could be used to estimate daily dew yield with reasonable accuracy. From this relationship, it was derived that the potential yield could be, expressed as a function of R_n and could reach up to a maximum of $0.40\text{ mm night}^{-1}$ under strong radiative cooling ($R_n \sim -100\text{ W m}^{-2}$).

Finally, it has to be stressed that the foil net radiation is required to predict dew yield with a reasonable accuracy, implying that the temperature of the foil surface should be either measured or estimated by means of a model describing the energy balance of the surface (Finch and Gash, 2002). Such a model would be of paramount interest (i) for assessing the performances of RDCs in different locations and climates and (ii) in the design of optimal RDC structure, shape and orientation.

Acknowledgments

The authors acknowledge the Foundation Seneca (Murcia, Spain) and the Ministry of Science and Innovation for the financial

support of this study through the grants 02978/PI/05 and AGL2010-15001 respectively.

References

- Agam, N., Berliner, P.R., 2006. Dew formation and water vapor adsorption in semi-arid environments – a review. *J. Arid Environ.* 65, 572–590.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. *Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, 300 pp.
- Beysens, D., 1995. The formation of dew. *Atmos. Res.* 39, 215–237.
- Beysens, D., Milimouk, I., Nikolayev, V., Muselli, M., Marcillat, J., 2003. Using radiative cooling to condense atmospheric vapor: a study to improve water yield. *J. Hydrol.* 276, 1–11.
- Beysens, D., Muselli, M., Nikolayev, V., Narhe, R., Milimouk, I., 2005. Measurement and modelling of dew in island, coastal and alpine areas. *Atmos. Res.* 73, 1–22.
- Beysens, D., Clus, O., Mileta, M., Milimouk, I., Muselli, M., Nikolayev, V.S., 2007. Collecting dew as a water source on small islands: the dew equipment for water project in Bišvo (Croatia). *Energy* 32, 1032–1037.
- Finch, J.W., Gash, J., 2002. Application of a simple finite difference model for estimating evaporation from open reservoir. *J. Hydrol.* 255, 253–259.
- Jacobs, F.G.A., Heusinkveld, B.G., Berkowicz, S.M., 2002. A simple model for potential dewfall in an arid region. *Atmos. Res.* 64, 285–295.
- Jacobs, F.G.A., Heusinkveld, B.G., Berkowicz, S.M., 2008. Passive dew collection in a grassland area, The Netherlands. *Atmos. Res.* 87, 377–385.
- Kidron, G.J., 1999. Altitude dependent dew and fog in the Negev Desert, Israel. *Agric. For. Meteorol.* 96, 1–8.
- Kidron, G.J., 2000. Analysis of dew precipitation in three habitats within a small arid drainage basin, Negev Highlands, Israel. *Atmos. Res.* 55, 257–270.
- Kidron, G.J., Herrnsdorf, I., Barzilay, E., 2002. The role of dew as a moisture source for sand microbiotic crusts in the Negev Desert, Israel. *J. Arid Environ.* 52, 517–533.
- Lekouch, I., Muselli, M., Kabbachi, B., Ouazzani, J., Melnytkouk-Milimouk, I., Beysens, D., 2011. Dew, fog, and rain as supplementary sources of water in south-western Morocco. *Energy* 36, 2257–2265.
- Monteith, J.L., 1957. Dew. *Quart. J. Royal Meteor. Soc.* 83, 322–341.
- Moro, M.J., Were, A., Villagarcia, L., Canton, Y., Domingo, F., 2007. Dew measurement by Eddy covariance and wetness sensor in a semiarid ecosystem of SE Spain. *J. Hydrol.* 335, 295–302.
- Muselli, M., Beysens, D., Marcillat, J., Milimouk, I., Nilsson, T., Louche, A., 2002. Dew water collector for potable water in Ajaccio (Corsica island, France). *Atmos. Res.* 64, 297–312.
- Muselli, M., Beysens, D., Soyeux, E., 2006a. Chemical composition of dew water from passive radiative condenser in Corsica Island (France). *J. Environ. Qual.* 35, 1812–1817.
- Muselli, M., Beysens, D., Milimouk, I., 2006b. A comparative study of two large radiative dew water condensers. *J. Arid Environ.* 64, 54–76.
- Muselli, M., Beysens, D., Mileta, M., Milimouk, I., 2009. Dew and rain water collection in the Dalmatian Coast, Croatia. *Atmos. Res.* 92, 455–463.
- Nilsson, T.M.J., 1994. Optical scattering properties of pigmented foils for radiative cooling and water condensation: theory and experiment. Ph.D. Thesis, Department of Physics, University of Technology, Göteborg, Sweden.
- Richards, K., 2009. Adaptation of a leaf wetness model to estimate dewfall amount on a roof surface. *Agric. For. Meteorol.* 149, 1377–1383.
- Sharan, G., 2007a. Harvesting dew to supplement drinking water supply in arid coastal villages of Gujarat. Indian Institute of Management. W.P. No. 08-05.
- Sharan, G., Singh S, Clus, O., Milimouk-Melnytkouk, I., Muselli, M., Beysens, D., 2007b. Roofs as Dew Collectors: III. Special Polyethylene Foil on a School in Sayara (NW India). In: *Proceedings of the 4th Conference on Fog, Fog Collection and Dew (La Serena, Chile)*, pp. 251–254.
- Sharan, G., Beysens, D., Milimouk-Melnytkouk, I., 2007c. A study of dew water yields on Galvanized iron roofs in Kothara (North-West India). *J. Arid Environ.* 69, 259–269.
- Steinberger, Y., Loboda, I., Garner, W., 1989. The influence of autumn dewfall on spatial and temporal distribution of nematodes in the desert ecosystem. *J. Arid Environ.* 16, 177–183.
- Vermeulen, A.T., Wyers, G.P., Romer, F.G., Van Leeuwen, N.F.M., Draaijers, G.P.J., Erisman, J.W., 1997. Fog deposition on a coniferous forest in the Netherlands. *Atmos. Environ.* 31, 375–386.

6. Conclusiones

Las principales **conclusiones** de la presente tesis son las siguientes:

1. La instalación de coberturas de sombreado en balsas de riego tiene efectos importantes en la calidad del agua almacenada.
 - 1.1 La cobertura de sombreado modifica el perfil térmico del agua induciendo a una estratificación térmica durante los meses estivales.
 - 1.2. La elevada reducción de la evaporación, junto con la alta permeabilidad a la lluvia de la cobertura, producen que el volumen de agua de lluvia que entra en la balsa sea superior al volumen de agua evaporado, provocando un descenso continuo de la conductividad eléctrica del agua. Esta reducción de la salinidad puede ser beneficiosa agronómicamente cuando se riega con agua de baja calidad.
 - 1.3. La reducción de la radiación solar reduce drásticamente la actividad fotosintética y, como consecuencia, la concentración de algas en la balsa disminuye. Además, la protección de la cobertura de sombreado contra el viento impide la entrada de partículas arrastradas, reduciendo la cantidad de sólidos en suspensión en el agua almacenada.
 - 1.4. El ligero incremento de clorofila-a y de turbidez después de las lluvias otoñales durante el segundo año de experimentación sugiere que la reducción de la radiación solar bajo la cobertura restringe el metabolismo microbiano a heterótrofos.
 - 1.5. La importante reducción del viento bajo la cobertura, que dificulta la difusión de oxígeno desde la superficie al reducir el oleaje, y la casi total eliminación de la radiación solar, que limita la producción de oxígeno al inhibir la fotosíntesis, dan lugar a una drástica reducción de la concentración de oxígeno disuelto. Esta reducción alcanza concentraciones hipóxicas en el agua de riego que podrían llegar a perjudicar el desarrollo de los cultivos.
 - 1.6. La mejora de la calidad del agua puede permitir reducir los requerimientos de filtrado y el riesgo de obturación de emisores en instalaciones de riego localizado, mejorando significativamente la eficiencia del uso del agua y de la energía.

2. Las instalaciones de riego localizado producen un incremento de la concentración de Oxígeno Disuelto (OD) cuando se emplea agua hipóxica para riego, alcanzando niveles superiores a las concentraciones críticas citadas en la literatura.

- 2.1. El incremento de OD en la circulación del agua a través de la bomba tiene poca relevancia, siendo la etapa donde mayor oxigenación del agua se observa el paso del agua por los emisores.

- 2.2. El grado de turbulencia del emisor afecta al nivel de recuperación de la concentración de OD, siendo los emisores con flujo más turbulento los que aportan mayor oxigenación.

- 2.3. El tránsito del agua por el perfil del suelo contribuye substancialmente al incremento de la concentración de OD. Estos incrementos se adscriben principalmente a los gradientes de OD en el suelo, siendo los cambios en la temperatura del agua en el suelo de bastante menor importancia para la oxigenación.

- 2.4. Los sistemas de riego hidropónico, carentes de emisores de riego, no tienen la capacidad de oxigenar el agua de riego. Bajo estas condiciones, se requiere la instalación de inyectoras de aire tipo venturi, que resultan muy eficientes al incrementar la concentración de OD en la solución de riego hasta saturación, aunque el agua originalmente sea hipóxica.

3. El uso de condensadores radiativos pasivos permite la captación de agua atmosférica bajo las condiciones climáticas del sureste español, manifestándose como un posible recurso hídrico complementario bajo situaciones de acceso al agua y la energía muy desfavorables.

- 3.1. En la región de estudio (sureste de España), la producción de rocío con un film de polietileno negro es superior a la obtenida con el estándar internacional (film de polietileno blanco). Las propiedades hidrofílicas del film de polietileno blanco podrían predominar sobre el mayor poder emisor del film de polietileno negro en regiones donde los eventos de condensación sean inferiores a $0,10 \text{ mm noche}^{-1}$.

- 3.2. El conocimiento de la emisividad en el rango completo del espectro infrarrojo es necesario para valorar correctamente el rendimiento de un film para la producción de condensación. Asegurar una alta emisividad

del film en todo el espectro es más efectivo que mejorar las propiedades hidrofílicas del film para incrementar la producción de rocío.

3.3. La estimación directa de la condensación diaria a partir de valores medios nocturnos de las variables meteorológicas habitualmente registradas en las estaciones ofrece resultados mediocres, siendo necesario un conocimiento preciso de la temperatura de superficie del film para obtener estimaciones precisas.

3.4. El film negro de polietileno negro presenta una mayor vida útil y un menor coste que el de polietileno blanco, resultando un material más adecuado para su uso en aplicaciones prácticas a gran escala.

Futuras líneas de trabajo

Las líneas futuras de trabajo que se plantean son las siguientes:

- 1.- En esta tesis se ha evaluado el efecto de la aplicación de una CSS sobre una balsa sin regulación para riego. Bajo estas condiciones, la instalación de la CSS (i) produjo una estratificación térmica en el agua de riego, (ii) redujo la conductividad eléctrica como consecuencia del balance positivo entre lluvia y evaporación, (iii) limitó considerablemente la presencia de algas y de sólidos en suspensión en el agua y (iv) provocó una reducción sustancial de la concentración de OD en el agua. Actualmente, el grupo de investigación trabaja en el análisis de la calidad del agua de varias balsas cubiertas y descubiertas con regulación para riego y con características similares, donde se almacena agua con idéntica procedencia. El objetivo es evaluar el efecto de la aplicación de CSSs sobre la calidad del agua en balsas de riego bajo una situación real en la Cuenca del Segura, contrastando los resultados con los obtenidos en una balsa no regulada.
- 2.- La instalación de la CSS sobre la balsa de riego permite mejorar la calidad del agua almacenada. Los requerimientos de filtrado del agua previos al riego se ven reducidos (ahorros de agua, de energía y de mantenimiento de la instalación). El estudio futuro que se plantea es cuantificar el efecto de la instalación de una CSS en los requerimientos de filtrado mediante el diseño y montaje de un cabezal de riego con equipo de filtrado portátil para analizar las diferencias en la reducción de filtrado entre balsas cubiertas y balsas descubiertas. Este estudio permitirá una evaluación económica más real sobre la viabilidad de la aplicación de las CSSs.

6. CONCLUSIONES

3.- Finalmente, uno de los trabajos presentados en esta tesis pretende analizar los factores físicos que condicionan la formación natural de la condensación de agua desde la atmósfera sobre superficies pasivas, como es el caso de los condensadores radiativos pasivos (CRPs). El fin último de esta línea de actuación es poder llegar a extrapolar los resultados sobre CRPs al caso de las CSSs, o incluso de las propias masas de agua, donde actualmente existe una imposibilidad técnica para cuantificar la condensación a escala real ya que la precisión de los sensores de presión es aproximadamente $\pm 0,4$ mm de columna de agua, cantidad inferior a los valores ordinarios de condensación durante la noche. Para poder llegar a extrapolar los resultados obtenidos sobre los condensadores a CSSs resulta necesario abordar la modelización del proceso de condensación sobre superficies radiativas pasivas. Por tanto, como futura línea de investigación, se plantea el desarrollo y validación experimental de modelos de condensación sobre superficies pasivas basados en la resolución del balance de energía que permitan la determinación precisa de la temperatura de superficie del cuerpo condensador a partir de algunas variables fácilmente medibles en las estaciones meteorológicas. La correcta estimación de la condensación sobre CRPs, CSSs, e incluso masas de agua podría determinarse fácilmente mediante la comparación de las temperaturas de superficie.

6. Conclusions

The main **conclusions** of this research work were the following:

1. The installation of the suspended shade cloth cover (SSCC) on an agricultural water reservoir (AWR) has important effects on the stored water quality.
 - 1.1. The SSCC modifies the water profile inducing a thermal gradient during the warmer months.
 - 1.2. The SSCC induces a positive balance between rainfall and electrical conductivity, conserving water and improving water quality by reducing the electrical conductivity. This reduction may produce agronomic benefits when low quality water is stored for irrigation.
 - 1.3. The solar radiation reduction strongly limits the photosynthetic activity reducing algal concentration. Besides, the wind shelter effect prevents the wind-borne dust and debris entrance, reducing the suspended solids.
 - 1.4. The slight increment of chlorophyll-a and turbidity suggest that excluding wind increases the rate of sedimentation of suspended particles, and excluding light restricts microbial metabolism to heterotrophy.
 - 1.5. Wind reduction impedes the oxygen diffusion on the surface by reducing the waves and solar radiation reduction limits the oxygen production by inhibiting the photosynthesis. That means a drastic reduction of DO in the irrigation water. Such reduction reaches hypoxic conditions that may have harmful effects on plants during the irrigation.
 - 1.6. The reduction in suspended particles reduces filtering requirements and the risk of emitter clogging in drip irrigation systems, significantly improving water and energy use efficiency especially when low quality water is stored.
2. Drip irrigation systems increase the dissolved oxygen concentration of hypoxic water, reaching higher levels than the critical values found in bibliography.
 - 2.1. The DO increase throughout the pump has very little relevance, being in the emitter's stage where water gets more oxygation.

- 2.2. The emitter turbulence has a great effect in the DO recovery, being the emitters with a higher turbulent flux which produce more oxygation.
 - 2.3. The passage of the water throughout the soil profile substantially increases the DO concentration. These increases are mainly ascribed to gradients of oxygen in the soil, being the changes in the water temperature in the soil of minor importance.
 - 2.4. Hydroponic systems lack drip emitters and usually consist of only tanks and pumps. Under these circumstances, there is no chance for water oxygation and the use of venturi air injectors is highly recommended to increase the DO in the irrigation nutritious solution up to saturation even with hypoxic water.
3. Radiative dew condensers allow to recover water from the atmosphere under the climatic conditions of the south-eastern Spain. They have demonstrated to serve as a complementary source of drinking water, mainly in developing countries, rural areas or small islands, where free-access to water and energy is unfavourable.
 - 3.1. In the region under studio (south-eastern Spain), the potential for dew yield of a low-cost black polyethylene foil is slightly higher than that of the OPUR-standard polyethylene foil, although the black foil does not present the hydrophilic properties of the latter. Hydrophilic properties of the white standard foil might predominate over the higher emissive power of black foil in regions characterised by small dew yield events ($<0.10 \text{ mm night}^{-1}$).
 - 3.2. The knowledge of the emissivity in the whole IR spectrum is necessary to accurately assess the performance of the foil. To ensure a high emissivity over the whole IR spectrum appeared more effective for increasing RDC yield than improving surface hydrophilic properties.
 - 3.3. Daily estimates of dew from the mean nightly values of the meteorological variables, usually registered, give mediocre results, being necessary a precise knowledge of the film surface temperature to reach accurate predictions.

3.4. The black polyethylene foil presents longer lifespan and lower cost than the white foil, being a proper material to be used for practical applications at a bigger scale.

Future research

The future work lines are the following:

1. - This thesis has evaluated the effect of the installation of a SSCC on water quality of an agricultural reservoir for irrigation, without irrigation regulation. Under these conditions, SSCC installation induced (i) a thermal stratification, (ii) an electrical conductivity reduction due to the positive balance between rain and evaporation and (iii) algae and solid suspension and dissolved oxygen concentration reduction.

Nowadays, the research group is working in the analysis of the effect of the installation of a SSCC on water quality of several agricultural water reservoirs used for irrigation. All of them with similar physical characteristics and with water from the same origin. The aim is to evaluate the effect of the installation of SSCCs on water quality on reservoirs under a real situation in the Segura River Basin, and make a comparison with the results obtained from a reservoir not used for irrigation.

2. - The installation of the SSCC over a reservoir, allows to improve the stored water quality. In that way, the irrigation water filtering requirements prior to the irrigation are reduced (saving water, energy and lowering maintenance cost). The future study aims at quantifying the effect of the installation of a SSCC on the filtering requirements by using a portable filtering equipment to assess the differences in the reduction of the filtering requirements between covered and uncovered reservoirs. This study will allow to make a more correct economic assessment of the viability of SSCCs installation.
3. - Finally, one of the studies presented for this thesis, aims at analyzing the physical factors that affect dew formation on passive surfaces, such as radiative dew condensers (RDCs). The purpose of this work line is to extrapolate the results obtained from RDCs to SSCCs or even water bodies, where at present there is a technical difficulty of quantifying dew formation due to the pressure sensor precision (about ± 0.4 mm of water column). That is a lower quantity than the ordinary values of dew formation during one night. In order to extrapolate the

6. CONCLUSIONS

results obtained from RDCs, it is necessary to simulate the dew formation process on radiative passive surfaces. Therefore, the future line of research aims at developing and validating models to estimate dew on passive surfaces based on the energy balance resolution. These models allow to precisely determine the condenser surface temperature from variables usually obtained in meteorological stations. A correct prediction of the dew formation on RDCs, SSCCs or even water bodies could be easily determined by comparison of the surface temperatures.

7. Referencias

- Adin, A., Rubinstein, L., Zilberman, A., 1989. Particle characterization in wastewater effluents in relation to filtration and irrigation. *Filtration and Separation*. 26 (4), 284–287.
- Adin, A., Sacks, M., 1991. Dripper clogging factors in wastewater irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 117 (6), 813–826.
- Agam, N. and Berliner, P.R., 2006. Dew formation and water vapor adsorption in semi-arid environments - a review. *Journal of Arid Environments*, 65,572–590.
- Ali, S., Ghosh, N. C., Singh, R., 2008. Evaluating best evaporation estimate model for water surface evaporation in semi-arid region, India. *Hydrological Processes*. 22 (8), 1093–1106.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, 300 pp.
- Ambriz, J.J. y H. Guerrero.,1976. Diseño y construcción de un enfriador nocturno aprovechando el fenómeno de radiación terrestre. Tesis de licenciatura de Ingeniería Química. Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Anon, Bernoulli's Equation, NASA.<http://www.brc.nasa.gov/WWW/K12/airplane/bern.html>. 2003
- Armstrong, W., Drew, M. C., 2002. Root growth and metabolism under oxygen deficiency. In: Waisel, Y., Eshel, A., Kafkafi, U. (Eds.), *Plant Roots. The Hidden Half*. M. Dekker, New York. pp. 729–761.
- Ayers, R.S., Westcot, D.W., 1985. Water quality for agriculture. Irrigation and Drainage. Paper 29, FAO, Rome, 174 pp.
- Bahdori, M., 1978. Passive cooling system in Iranian Architecture. *Sci. Am.* 238, 2, pp. 144–154.
- Barnes GT. 2008. The potential for monolayers to reduce the evaporation of water from large water storages. *Agricultural Water Management* 95: 339-353.
- Baulch, H., Turner, M., Findlay, D., Vinebrooke, R., Dohahue, W., 2009. Benthic algal biomass – measurements and errors. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*. 66, 1989–2001.

7. REFERENCIAS

- Ben-Gal, A., Ityel, E., Dudley, L., Cohen, S., Yermiyahu, U., Presnov, E., Zigmond, L., Shani, U., 2008. Effect of irrigation water salinity on transpiration and on leaching requirements: A case study for bell peppers. *Agricultural Water Management*. 95, 587–597.
- Beysens, D., 1995. The formation of dew. *Atmospheric Research*, 39, 215–237.
- Beysens, D., Milimouk, I., Nikolayev, V., Muselli, M. Marcillat, J., 2003. Using radiative cooling to condense atmospheric vapor: a study to improve water yield. *Journal of Hydrology*, 276, 1–11.
- Beysens, D., Muselli, M., Nikolayev, V., Narhe, R. and Milimouk, I., 2005a. Measurement and modelling of dew in island, coastal and alpine areas *Atmospheric Research*, 73, 1–22.
- Beysens D., Mylymuk I., 2005b. À la poursuite des fontaines aériennes. Les incroyables aventures de Français en Ukraine. Editeur : book-e-book/Collection : Zététique.
- Beysens D., 2006. Dew nucleation and growth. *C. R. Physique* 7, 1082–1100.
- Beysens, D., Clus, O., Mileta, M., Milimoukc, I., Musell, M. and Nikolayev, V.S., 2007. Collecting dew as a water source on small islands: the dew equipment for water project in Bis̃evo (Croatia). *Energy*, 32, 1032–1037.
- Bhattarai, S., Huber, S., Midmore, D. J., 2004. Aerated subsurface irrigation water gives growth and yield benefits to zucchini, vegetable soybean and cotton in heavy clay soil. *Ann. Appl. Biol.* 144, 285–298.
- Bhattarai, S. P., Su, N., Midmore, D. J., 2005. Oxygenation unlock yield potentials of crops in oxygen limited soil environments. *Advances in Agronomy*. 88, 313–377.
- Bhattarai, S. P., Su, N., Midmore, D. J., Pendergast, L., 2008. Yield, water-use efficiencies and root distribution of soybean, chickpea and pumpkin under different subsurface drip irrigation depths and oxygenation treatments in vertisols. *Irrig Sci.* 26, 439–450.
- Bonachela, S., Acuña, R. A., Casas, J., 2007. Environmental factors and management practices controlling oxygen dynamics in agricultural irrigation ponds in a semi-arid Mediterranean region: Implications for pond agricultural functions. *Water Research*. 41, 1225–1234.
- Bonachela, S., Quesada, J., Acuña, R. A., Magán, J. J., Marfà, O., 2010. Oxyfertilization of a greenhouse tomato crop grown on rockwool slabs and irrigated with treated

- wastewater: Oxygen content dynamics and crop response. *Agr. Water Manage.* 97, 433–438.
- Brainwood, A., Burgin, S., Maheshwari, B., 2004. Temporal variations in water quality of farm dams: impacts of land use and water sources. *Agricultural Water Management*. 70, 151–175.
- Brandt, A., Bresler, E., Diner, N., Ben-Asher, I., Heller, J., Goldberg, D., 1971. Infiltration from a Trickle Source: I. Mathematical Models. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35, 675–682.
- Brown, J.A.H., 1988. The Potential for Reducing Open Water Evaporation Losses: A Review. *Hydrology and Water Resources Symposium*. ANU, Canberra, Australia, 108–115.
- Bucks, D., Nakayama, F., 1991. Water quality in drip/trickle irrigation: A review. *Irrigation Science*. 12 (4), 187–192.
- Chen, X., Kong, H., He, S., Wu, D., Li, C., Huang, X., 2009. Reducing harmful algae in raw water by light-shading. *Process biochemistry*. 44, 357–360.
- Chérif, M., Tirilly, Y., Bélanger, R. R., 1997. Effect of oxygen concentration on plant growth, lipidperoxidation, and receptivity of tomato roots to pythium under hydroponic conditions. *Eur. J. Plant Pathol.* 103, 255–264.
- CHS, 1997. Plan Hidrológico de la Cuenca del Segura, Confederación Hidrográfica del Segura, Ministerio de Medio Ambiente.
- CHS, 2007. Estudio General sobre la Demarcación Hidrográfica del Segura. Confederación Hidrográfica del Segura, Murcia. Disponible en: <http://www.chsegura.es>
- Chuvieco E., 2008. Teledetección Ambiental. Ariel, Barcelona.
- Clus, O., 2007. Condenseurs radiatifs de la vapeur d’eau atmosphérique (Rosée) comme source alternative d’eau douce. Thèse soutenu le 10-04-2007 à l’Université de Corse Pasquale Paoli, Faculté des sciences et technique.
- Cooley, K.R., 1983. Evaporation reduction: summary of long-term tank studies. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-Asce* 109, 89-98.
- Craig, I., Green, A., Scobie, M., Schmidt, E., 2005. Controlling evaporation loss from water storages. NCEA Publication No. 1000580/1, Queensland, pp. 207.
- Daigo, K., Phaovattana, V., 1999. Evaporation and percolation control in small farm ponds in Thailand. *Jarq-Japan Agricultural Research Quarterly*. 33 (1), 47–56.

7. REFERENCIAS

- Deas, M.L., Lowney, C. L., 2000. Water temperature modelling review. Central Valley. The Bay Delta Modeling Forum.
- D.M.A., 2005. Informe de los Artículos 5 y 6 de la Directiva Marco de las Aguas. <http://www.chsegura.es>
- Dolz, J., Puertas, J., Aguado, A., Agulló, L., 1995. Efectos térmicos en presas y embalses. E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Downing, J.A., Prairie, Y.T., Cole, J.J., Duarte, C.M., Tranvik, L.J., Striegl, R.G., McDowell, W.H., Kortelainen, P., Caraco, N.F., Melack, J.M., Middelburg, J.J., 2006. The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments. *Limnology and Oceanography*. 51: 2388–2397.
- Duffie, J.A., Beckman, W.A., 1974. Solar energy thermal processes. John Wiley & Sons, Inc.
- Finch, J.W. and Gash, J., 2002. Application of a simple finite difference model for estimating evaporation from open reservoir. *Journal of hydrology*, 255, 253–259
- Finn, N., Barnes, S., 2007. The benefits of shade-cloth covers for potable water storages, CSIRO Textile & Fibre Technology. CSIRO Gale Pacific. 42 pp.
- Furusato, E., Asaeda, T., Manatunge, J., 2004. Tolerance for prolonged darkness of three phytoplankton species, *Microcystis aeruginosa* (Cyanophyceae), *Scenedesmus quadricauda* (Chlorophyceae), and *Melosira ambigua* (Bacillariophyceae). *Hydrobiologia*. 527, 153–162.
- Gallego-Elvira, B., Baille, A., Martín-Górriz, B., Maestre-Valero, J. F., Martínez-Alvarez, V., 2011. Energy balance and evaporation loss of an irrigation reservoir equipped with a suspended cover in a semi-arid climate (south-eastern Spain). *Hydrological Processes*. 25, 1694–1703.
- Gladyshev, M., 2002. Biophysics of the Surface Microlayer of Aquatic Ecosystems. Intl Water Assn Publishing, London, UK, pp. 160.
- Goorahoo, D., Carstensen, G., Zoldoske, D. F., Norum, E., Mazzei, A., 2001. Using air in subsurface drip irrigation (SDI) to increase yields in bell pepper. In *Proceedings of the Irrigation Association Technical Conference*, San Antonio, Texas, pp. 95–102.

- Gökbulak F, Özhan S., 2006. Water loss through evaporation from water surfaces of lakes and reservoirs in Turkey. Official Publication of the European Water Association.
- Guyer E.C., Brownell D.L., 1999. Handbook of Applied Thermal Design, 1st edition. Pub. Taylor and Francis. Book, 600p.
- Hezarjaribi, A., Dehghani, A. A., Meftah Helghi, M., Kiani, A., 2008. Hydraulic performances of various trickle irrigation emitters. *J. Agr.* 7 (3), 265–271.
- Hipsey MR, Sivapalan M. 2003. Parameterizing the effects of a wind shelter on evaporation from small water bodies. *Water Resources Research* 39, 1339.
- Huber, S., 2000. New uses for drip irrigation: partial root zone drying and forced aeration, M.Sc. Thesis, Technische Universität München, Germany. 90 pp.
- Hudson, N.W., 1987. Soil and Water Conservation in Semi-arid Regions. FAO, Land and Water Conservation Service, Rome, pp. 256.
- I.N.E., 2006. Instituto Nacional de Estadística. <http://www.ine.es>
- IPCC, 2007. Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. <http://www.ipcc.ch>. Accessed 26 July 2010.
- Jacobs, F.G.A., Heusinkveld, B.G. and Berkowicz, S.M., 2002. A simple model for potential dewfall in an arid region. *Atmospheric Research*, 64, 285–295.
- Jacobs, F.G.A., Heusinkveld, B.G. and Berkowicz, S.M., 2008. Passive dew collection in a grassland area, The Netherlands. *Atmospheric Research*, 87, 377–385.
- Kamal, H., 2010. Corn crop response under managing different irrigation and salinity levels. *Agr. Water Manage.* 97, 1553–1563.
- Karico, 2000. Technical report (I): the survey of pollution sources of water for the agricultural use (in Korean). Korean Agricultural and Rural Infrastructure Cooperation, pp. 1–626.
- Keller J. and Karmelli, D., 1975. Trickle irrigation design. Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corp, Glendora, Calif..
- Kidron, G.J., 1999. Altitude dependent dew and fog in the Negev Desert, Israel. *Agricultural and Forest Meteorology*, 96, 1–8.
- Kidron, G.J., 2000. Analysis of dew precipitation in three habitats within a small arid drainage basin, Negev Highlands, Israel. *Atmospheric Research*, 55, 257–270.
- Kidron, G.J., Herrnsdtadt, I, Barzilay E., 2002. The role of dew as a moisture source for sand microbiotic crusts in the Negev Desert, Israel. *Journal of Arid Environments*, 52, 517–533

7. REFERENCIAS

- Kirnak, H., Douán, E., Demür, S., Yalçın, S., 2004. Determination of hydraulic performance of trickle irrigation emitters used in irrigation systems in the Harran Plain. *Turk J Agric For* 28, 223–230.
- Koberg, G.E., Ford, M.E., 1965. Elimination of thermal stratification in reservoirs and resulting benefits. United States Geological Survey, 1809-M: 28.
- Koenigsberger, O., Ingersoll, T., Mayhew, A., Szokolay, S., 1977. *Viviendas y edificios en zonas cálidas y tropicales*, Paraninfo Editores, Madrid.
- Lekouch, I., Muselli, M., Kabbachi, B., Ouazzani, J. Melnytchouk-Milimouk, I. and Beysens, D., 2010. Dew, fog, and rain as supplementary sources of water in south-western Morocco. *Energy* 36, 2257–2265.
- Letey, J., Stolzy, L. H., Valoras, N., Szuskiewicz, T. E., 1962. Influence of soil oxygen on growth and mineral concentration of barley. *Agron. J.* 54, 538–540.
- Maestre-Valero, J. F., Martínez-Alvarez, V., Gallego-Elvira, B., 2009. Effects of suspended shade-cloth covers on the water quality of agricultural water reservoirs for irrigation, International Symposium of the Australian Society for Engineering in Agriculture. Personal communication.
- Marfà, O., Cáceres, R., Guri, S., 2005. Oxyfertilization: a new technique for soilless culture under mediterranean conditions. *Acta Horti.* 697, 65–72.
- Martin, J.L., McCutcheon, S. C., 1999. *Hydrodynamics and transport for water quality modelling*. Lewis Publishers.
- Martínez-Alvarez, V., Baille, A., Molina-Martínez, J. M., González-Real, M. M., 2006. Efficiency of shading materials in reducing evaporation from free water surfaces. *Agr. Water Manage.* 84, 229–239.
- Martínez-Alvarez, V., Gonzalez-Real, M. M., Baille, A., Maestre-Valero, J. F., Gallego-Elvira, B., 2008. Regional assessment of evaporation from agricultural irrigation reservoirs in a semiarid climate. *Agr. Water Manage.* 29, 1056–1066.
- Martínez-Alvarez, V., Calatrava-Leyva, J., Maestre-Valero, J. F., Martín-Górriz, B., 2009. Economic assessment of shade-cloth covers for agricultural irrigation reservoirs in a semi-arid climate. *Agr. Water Manage.* 96, 1351–1359.
- Monteith, J.L., 1957. Dew. *The Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 83, 322–341.
- Morard, P., 1995. Etude de l'oxygénation du système racinaire. In: SARL (Ed.). *Les cultures vegetables hors-soil*. Agen, France , pp. 245–252.
- Moreno, J.M, Cruz A., 2005. Principales conclusiones de la evaluación preliminar de

- los impactos en España del Cambio Climático. Jornadas sobre impactos del Cambio Climático en la hidrología de las Islas Canarias.
- Moro, M. J., Were, A., Villagarcia, L., Canton, Y. and Domingo, F., 2007. Dew measurement by Eddy covariance and wetness sensor in a semiarid ecosystem of SE Spain. *Journal of Hydrology*, 335, 295–302.
- Mugabe, F.T., Hodnett, M.G., Senzanje, A., 2003. Opportunities for increasing productive water use from dam water: a case study from semi-arid Zimbabwe. *Agricultural Water Management* 62, 149–163.
- Muselli, M., Beysens, D., Marcillat, J., Milimouk, I., Nilsson, T. and Louche, A., 2002. Dew water collector for potable water in Ajaccio (Corsica island, France). *Atmospheric Research*, 64, 297–312.
- Muselli, M., Beysens, D., Soyeux, E., 2006a. Chemical composition of dew water from passive radiative condenser in Corsica Island (France). *Journal of Environmental Quality* 35, 1812–1817.
- Muselli, M., Beysens, D. and Milimouk, I., 2006b. A comparative study of two large radiative dew water condensers. *Journal of Arid Environments*, 64, 54–76.
- Muselli, M., Beysens, D., Mileta, M. and Milimouk, I., 2009. Dew and rain water collection in the Dalmatian Coast, Croatia. *Atmospheric Research*, 92, 455–463.
- Ngigi, S.N., Savenije, H.H.G., Thome, J.N., Rockström, J., Penning, de Vries, F.W.T., 2005. Agro-hydrological evaluation of on-farm rainwater storage systems for supplemental irrigation in Laikipia district, Kenya. *Agricultural Water Management* 73, 21–41.
- Nikolayev, V., Beysens, D., Gioda, A., Milimouk, I., Katiushin, E. and Morel, J. P., 1996. Water recovery from dew. *Journal of Hydrology* 182, 19–35.
- Nilsson, T.M.J., 1994. Optical scattering properties of pigmented foils for radiative cooling and water condensation: theory and experiment. Ph.D. Thesis, Department of Physics, University of Technology, Göteborg, Sweden.
- Nilsson, T.M.J., 1996. Initial experiments on dew collection in Sweden and Tanzania. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 40, 23–32.
- Palacios, V.O. y Aceves, N.E., 1970. Instructivo para el muestreo, registro de datos e interpretación de la calidad del agua para riego agrícola. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.

7. REFERENCIAS

- Parry, M.A.J., Flexas, J., Medrano, H., 2005. Prospects for crop production under drought: research priorities and future directions. *Annals of Applied Biology*. 147 (3). p.211.
- Plan de actuación en situaciones de alerta y sequía en la Cuenca del Segura, PASASCS,. 2006. www.chsegura.es
- Pedro, M.J. and Gillespie, T.J., 1982. Estimating dew duration. I. Utilizing micrometeorological data. *Agricultural Meteorology* 25, 283–296.
- Ravina, I., Paz, E., Sofer, Z. Marcu, A., Schischa, A., Sagi, G., 1992. Control of emitter clogging in drip irrigation with reclaimed wastewater. *Irrigation Science*. 13, 129–139.
- Raviv, M., Wallach, R., Blom, T. J., 2004. The effect of physical properties of soilless media on plant performance, a review. *Acta Horti*. 644, 251–259.
- Richards, K., 2009. Adaptation of a leaf wetness model to estimate dewfall amount on a roof surface. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 1377–1383.
- Romero-Rojas, J. A., 1999. Calidad del agua. Alfaomega.
- Russell, E. J., Appleyard, A., 1915. The Atmosphere of the Soil: Its Composition and the Causes of Variation. *The Journal of Agricultural Science* 7, 1–48.
- Santamouris, M, Asimakopoulos, D, 1996. *Passive Cooling of Buildings*, James and James (Science Publishers) Ltd, London.
- Sharan, G., 2007a. Harvesting dew to supplement drinking water supply in arid coastal villages of Gujarat. Indian Institute of Management. W.P. No. 08–05.
- Sharan, G., Singh S, Clus, O., Milimouk-Melnychouk, I., Muselli, M., Beysens, D., 2007b. Roofs as Dew Collectors: III. Special Polyethylene Foil on a School in Sayara (NW India). *Proceedings of the 4th Conference on Fog, Fog Collection and Dew (La Serena, Chile)*, 251–254.
- Sharan, G., Beysens, D. and Milimouk-Melnychouk, I., 2007c. A study of dew water yields on Galvanized iron roofs in Kothara (North-West India). *Journal of Arid Environments*, 69, 259–269.
- Sharan, G., Clus, O., Singh, S., Muselli, M., Beysens, D., 2011. A very large dew and rain ridge collector in the Kutch area (Gujarat, India). *Journal of Hydrology* 405, 171–181
- Sobrino J.A., 2000. Teledetección. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Valencia, Valencia.

- Sperling, E., Da Silva, A.C., Lodolf, L.N., 2008. Comparative eutrophication development in two Brazilian water supply reservoirs with respect to nutrient concentrations and bacteria growth. *Desalination*. 226, 169–174.
- Steinberger, Y., Loboda, I. and Garner, W., 1989. The influence of autumn dewfall on spatial and temporal distribution of nematodes in the desert ecosystem. *Journal of Arid Environments*, 16, 177–183.
- Stolzy, L. H. and Letey, J., 1964. Characterizing soil oxygen conditions with a platinum microelectrode. *Adv. Agron.* 16, 249–279.
- Vermeulen, A.T., Wyers, G.P., Romer, F.G., Van Leeuwen, N.F.M., Draaijers, G.P.J. and Erisman, J.W., 1997. Fog deposition on a coniferous forest in the Netherlands. *Atmospheric Environment*, 31, 375–386.
- Wetzel, R. G., 2001. *Limnology*. Third Edition. Academic Press.
- Yun-kai, L. I., Pei-ling, Y., Shu-mei, R., 2006. Hydraulic characterizations of tortuous flow in path drip irrigation emitter, *J. Hyd., Ser. B* 18 (4), pp. 449–457.
- Zhao H., Beysens D., 1995. From Droplet Growth to Film Growth on a Heterogeneous Surface: Condensation Associated with a Wettability Gradient. *Langmuir* 1996, 11, 627–634.

Apéndice I: Cartas de aceptación de las publicaciones

Publicación 1

Date: Aug 26, 2011
To: "Jose Francisco Maestre-Valero" josef.maestre@upct.es
From: "Agricultural Water Management" agwat@elsevier.com
Subject: Your Submission

Ref.: Ms. No. AGWAT3590R2
Effects of a Suspended Shade Cloth Cover on Water Quality of an Agricultural Reservoir for Irrigation
Agricultural Water Management

Dear Mr. Maestre-Valero,

I am pleased to tell you that your work has now been accepted for publication in Agricultural Water Management. The manuscript will be transferred to our production site for preparation for press. I will be your contact person during the production process of the paper towards the final publication on the web (Science Direct) and on paper (in the printed-on-paper issue).

Proofs will be sent to you in due course.

If there were any comments from the Editor and/or Reviewers, they can be found below.

Thank you for submitting your work to this journal.

With kind regards,

Pallavi Das
Journal Manager
Agricultural Water Management
agwat@elsevier.com

Comments from the Editors and Reviewers:

Dear Dr Maestro-Valero,

I can now inform you that the review process of the manuscript is terminated. I do not have further remarks and the paper is accepted for publication in "Agricultural Water Management".

I am looking forward to the publication of your paper and I like to thank you for having chosen "Agricultural Water Management" to present your research work.

With kind regards,

Willy Dierickx,
Co-Editor-in-Chief.

Publicación 2

Date: Jun 30, 2010
To: "Jose Francisco Maestre-Valero" josef.maestre@upct.es
From: "Agricultural Water Management" agwat@elsevier.com
Subject: Your Submission

Ref.: Ms. No. AGWAT2742R3
Effects of drip irrigation systems on the recovery of dissolved oxygen from hypoxic water
Agricultural Water Management

Dear Mr. Maestre-Valero,

I am pleased to tell you that your work has now been accepted for publication in Agricultural Water Management. The manuscript will be transferred to our production site for preparation for press. I will be your contact person during the production process of the paper towards the final publication on the web (Science Direct) and on paper (in the printed-on-paper issue).

Proofs will be sent to you in due course.

If there were any comments from the Editor and/or Reviewers, they can be found below.

Thank you for submitting your work to this journal.

With kind regards,

Herman Engelen
Journal Manager
Agricultural Water Management
agwat@elsevier.com

Comments from the Editors and Reviewers:

Dear Jose Francisco Maestre-Valero: The paper is accepted for publication. Many thanks for the prompt revisions.
Regards,

Jim

Publicación 3

Date: 10 Sep 2011
To: "Jose Maestre" josef.maestre@upct.es
cc: hydrolkpg@hrc-lab.org;msmorin@mscc.huji.ac.il
From: "J. Hydrology" hydrol-eo@elsevier.com
Subject: HYDROL11280R2: Editor's decision: accepted

Dear Mr Maestre,

I am pleased to inform you that the manuscript
"Comparative Analysis of Two Polyethylene Foil Materials for Dew Harvesting in a Semi-arid Climate" (Mr Jose Maestre)
has now been accepted for publication.

Your manuscript will soon be passed to the production department for further handling. Then you will receive further notice.

Thank you for considering our journal for the publication of your research.

With kind regards,

Konstantine P. Georgakakos, Sc. D.
Editor
Journal of Hydrology

Associate Editor: I read the revised manuscript and the response to the reviewer. The manuscript is now acceptable for publication.

Apéndice II: Índices de impacto de las publicaciones

Publicación 1

Referencia

Maestre-Valero JF, Martínez-Alvarez V, Gallego-Elvira B, Pittaway P. Effects of a suspended shade cloth cover on water quality of an agricultural reservoir for irrigation. 2011. *Agricultural Water Management*; 100, 70 – 75.

Factor de impacto de la revista *Agricultural Water Management*

- Factor de impacto: 1,782

Fuente: ISI Web of Knowledge, Journal Citation Reports, 2010 JCR Science Edition.

Publicación 2

Referencia

Maestre-Valero JF, Martínez-Alvarez V. 2010. Effects of drip irrigation systems on the recovery of dissolved oxygen from hypoxic water. *Agricultural Water Management*; 97, 1806 – 1812.

Factor de impacto de la revista *Agricultural Water Management*

- Factor de impacto: 1,782

Fuente: ISI Web of Knowledge, Journal Citation Reports, 2010 JCR Science Edition.

Publicación 3

Referencia

- **Maestre-Valero JF**, Martínez-Alvarez V, Baille A, Martín-Górriz B, Gallego-Elvira B. 2011. Comparative analysis of two polyethylene foil materials for dew harvesting in a semi-arid climate. *Journal of Hydrology*; 210, 84 – 91.

Factor de impacto de la revista *Journal of Hydrology*

- Factor de impacto: 2,514

Fuente: ISI Web of Knowledge, Journal Citation Reports, 2010 JCR Science Edition.